СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 18, № 4

Красноярск 2017

СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Том 18, № 4

Главный редактор
Ковалев Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор

Заместители главного редактора
Логинов Юрий Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор
Сенашов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, профессор
Мурыгин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аплеснин С. С., доктор физико-математических наук, профессор
Головенкин Е. Н., доктор технических наук, профессор
Ерыгин Ю. В., доктор экономических наук, профессор
Лаптенок В. Д., доктор технических наук, профессор
Медведев А. В., доктор технических наук, профессор
Михеев А. Е., доктор технических наук, профессор
Москвичев В. В., доктор технических наук, профессор
Сафонов К. В., доктор физико-математических наук, доцент
Смирнов Н. А., доктор технических наук, профессор
Сомов В. Г., доктор технических наук, доцент

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев С. Н., академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Москва)
Дегерменджи А. Г., академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)
Дегтерев А. С., доктор технических наук, профессор (Красноярск)
Калвода Л., кандидат наук, доцент (Прага, Чехия)
Колмыков В. А., кандидат технических наук, профессор (Красноярск)
Краточвилова И., доктор, доцент (Прага, Чехия)
Краус И., профессор (Прага, Чехия)
Лопатин А. В., доктор технических наук, профессор (Красноярск)
Лю Т., профессор (Пекин, Китай)
Минкер В., доктор, профессор (Ульм, Германия)
Миронов В. Л., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)
Павера Р., доцент (Братислава, Словакия)
Семенкин Е. С., доктор технических наук, профессор (Красноярск)
Тестоедов Н. А., член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор (Железногорск)
Фошнер М., доктор, доцент (Марибор, Словения)
Чжанг Ш., доктор (Тяньцзинь, Китай)
Шабанов В. Ф., академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)
Шайдуров В. В., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор (Красноярск)
Швиденко А., доктор инженерных наук, профессор (Лаксембург, Австрия)
Эйя Х., доктор инженерных наук, профессор (Тронхейм, Норвегия)

© СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2017

SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Vol. 18, No 4

Chief Editor:
Kovalev I. V.
Dr.Sc., Professor

Deputy Chief Editors
Loginov Y. Y., Dr.Sc., Professor
Senashov S. I., Dr.Sc., Professor
Murygin A. V., Dr.Sc., Professor

EDITORIAL BOARD

Aplesnin S. S., Dr.Sc., Professor
Golovenkin E. N., Dr.Sc., Professor
Erygin Y. V., Dr.Sc., Professor
Laptenok V. D., Dr.Sc., Professor
Medvedev A. V., Dr.Sc., Professor
Mikheev A. E., Dr.Sc., Professor
Moskvichev V. V., Dr.Sc., Professor
Safonov K. V., Dr.Sc., Docent
Smirnov N. A., Dr.Sc., Professor
Somov V. G., Dr.Sc., Docent

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev S. N., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Moscow)
Degermendzhi A. G., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Degterev A. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Kalvoda L., Cand.Sc.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)
Kolmykov V. A., Cand.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Kratochvilova I., Dr.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)
Kraus I., Sc.D., Professor (Prague, Czech Republic)
Lopatin A. V., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Liu T., Ph.D., Professor (Beijing, China)
Minker W., Dr.-Ing., Professor (Ulm, Germany)
Mironov V. L., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Pawera R., Associate Professor (Bratislava, Slovakia)
Semenkin E. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Testoedov N. A., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Zheleznogorsk)
Fošner M., Ph.D. Associate Professor (Maribor, Slovenia)
Zhang S., Ph.D. (Tianjin, China)
Shabanov V. F., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Shaidurov V. V., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)
Shvidenko A., Dr.-Ing., Professor (Laxenburg, Austria)
Oye H., Dr.-Ing, Professor (Trondheim, Norway)

© Reshetnev University, 2017

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Сибирский журнал науки и технологий» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-70577 от 03.08.2017 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2587-6066.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» – 39263.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Включен в базу данных Ulrich's Periodicals Directory американского издательства Bowker.

Входит в перечень журналов ВАК по следующим группам научных специальностей:
01.04.00 – физика;
05.02.00 – машиностроение и машиноведение;
05.07.00 – авиационная и ракетно-космическая техника;
05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление;
08.00.00 – экономические науки.

Выпускается с 2000 года. До 2002 года журнал носил название «Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева» («Вестник САА»), до мая 2017 года – «Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева».

Каждый выпуск журнала включает четыре раздела:
1 раздел. Математика, механика, информатика.
2 раздел. Авиационная и ракетно-космическая техника.
3 раздел. Технологические процессы и материалы.
4 раздел. Экономика.

Статьи публикуются бесплатно после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.vestnik.sibsau.ru). Журнал выходит 4 раза в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (http://www.elibrary.ru) и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Сибирский журнал науки и технологий» ссылка обязательна.

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

АДРЕС РЕДАКЦИИ, УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ:
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева,
Российская Федерация, 660037, Красноярск,
проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31,
П-416. Тел./ факс (391)291-90-19
E-mail: vestnik@sibsau.ru

INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

Siberian Journal of Science and Technology is a research, production and practical peer-reviewed journal. Included by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation in the Index of Leading Russian Peer-Reviewed Journals and Periodicals, in which significant scientific dissertation results should be published when applying for a Dr.Sc. degree.
The journal is the official periodical of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate: PI No. FC 77-50577, dated 03 August 2017, given by Federal Supervision Agency for Information Technology, Communications and Mass Media.

The Journal is included in the following subscription catalogue 39263 – Pressa Rossii.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).
The journal is indexed in the database of Ulrich's Periodicals Directory.

The journal was first published in 2000. Prior to 2002 it had the title *Vestnik Sibirskoi aerokosmicheskoi akademii imeni academika M. F. Reshetneva (Vestnik SAA)*, prior to may 2017 it had the title *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*.

he Journal is recommended for publishing the main results of research when applying for Cand. Sc. degree and Dr. Sc. degree upon the following specialties:
01.04.00 – physics;
05.02.00 – machine engineering and science of mechanics;
05.07.00 – aviation and spacecraft engineering;
05.13.00 – management, computer technology and informatics;
08.00.00 – economics. Each issue consists of four parts.

Each issue consists of four parts:
Part 1. Mathematics, Mechanics, Computer Science.
Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.
Part 3. Technological Processes and Material Science.
Part 4. Economics Aerospace Industry.

Papers prepared in accordance with the editorial guidelines (www.vestnik.sibsau.ru) are published free of charge after being peer reviewed.

The journal is published four times a year.

An online version can been viewed at http://www.elibrary.ru

Siberian Journal of Science and Technology should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

CONTACTS. Website: www.vestnik.sibsau.ru
Address: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk,
660037, Russian Federation.
Tel./ fax (391)291-90-19; e-mail: vestnik@sibsau.ru

Редактор: О. А. Плехова
Редактор английского текста С. Г. Эфа
Оригинал-макет и верстка О. В. Булатниковой
Подписано в печать 26.12.2017. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 35,4.
Уч.-изд. л. 43,2. Тираж 1000 экз. Заказ 22/265. С 297/17.
Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М.Ф. Решетнева.
Отпечатано в редакционно-издательском центре
СибГУ им. М.Ф. Решетнева.
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск,
просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
Дата выхода в свет: 12.01.2018. Свободная цена

Editor O. A. Plekhova, *Editor* (*English Language*) S. G. Efa
Layout original O. V. Bulatnikova
Signed (for printing): 26.12.2017. Format 70×108/16.
Offset Paper. Print flat. 35,4. Published sheets 43,2.
1000 copies. Order 22/265. C 297/17.
Printing and Publication Department
Reshetnev University.
Printed in the Department of copying and duplicating equipment Reshetnev University.
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk,
660037, Russian Federation.
Date of publication: 12.01.2018. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Абенова Ж. С., Петров М. Н. Исследование методов процесса разработки и эксплуатации программного продукта 706
Агафонов Е. Д., Шишкина А. В. О непараметрическом управлении динамической системой 711
Гусев С. А., Николаев В. Н. Численно-статистический метод для решения задач теплообмена в теплозащитных конструкциях сотового типа 719
Денисов М. А., Чжан Е. А. О параметрических алгоритмах идентификации дискретно-непрерывных процессов 727
Иванов И. А., Брестер К. Ю., Сопов Е. А. Обобщенный метод анализа мультимодальных данных на основе оптимизационного подхода 736
Ковалев И. В., Лосев В. В., Сарамуд М. В., Ковалев Д. И., Петросян М. О., Брезицкая В. В. Использование инструментальных средств операционной системы реального времени для реализации мультиверсионной среды исполнения бортового программного обеспечения автономных беспилотных объектов 744
Корнет М. Е., Орлова А. С. О непараметрических алгоритмах управления группами объектов 748
Медведев А. В., Раскина А. В. О непараметрической идентификации и дуальном управлении квазилинейными динамическими процессами 754
Михов Е. Д. Использование методов генетического программирования для задач идентификации безынерционных систем 764
Панфилова Т. А., Панфилов И. А., Золотарев В. В., Ковалев И. В., Сопов Е. А. Модель функционирования программной системы на основе GERT-сети 773
Паротькин Н. Ю., Панфилов И. А., Золотарев В. В., Кушко Е. А., Панфилова Т. А. Разработка и экспериментальное исследование протокола динамического адресного пространства на основе мультикаст-групп 779
Пашковская О. В., Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., Юферова Н. Ю. Моделирование стоимости жилья на вторичном рынке недвижимости в г. Красноярске в 2016 году 788
Пятаева А. В., Бандеев О. Е. Алгоритм обнаружения пламени по видеоданным 796
Раскина А. В. Сравнительный анализ типовых алгоритмов регулирования с непараметрическим алгоритмом дуального управления 804
Рогалев А. А. Алгоритмы символьных вычислений на основе корневых деревьев для оценки возможностей управления 810
Ручкин Л. В., Ручкина Н. Л. Моделирование трансформируемых механических систем 820
Сопова Л. Н., Чернова С. С. К задаче непараметрического робастного оценивания функции регрессии по наблюдениям 825

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Бойко О. Г., Ачкасова Е. А. О моделировании механизма формирования отказов в невосстанавливаемых и восстанавливаемых системах 834
Вшивков Ю. Ф., Кривель С. М. Методика и программный комплекс исследования продольной статической устойчивости экраноплана на этапе проектирования 841
Гордиенко Е. С., Платов И. В., Симонов А. В. Анализ миссий в систему Юпитера: состоявшиеся, осуществляемые и перспективные 851
Казанцев З. А. Разработка концепции раскрытия механической системы радарной антенны космического назначения 858
Калошин И. Б., Харламов А. Г., Скрипачев В. О., Суровцева И. В., Иванов В. К. Системный подход к выбору целевой аппаратуры малых космических аппаратов 868
Латынцев С. В., Меус С. В., Овчинников А. В. Алгоритм оценки угловой скорости космического аппарата в режиме живучести 876
Тамбасова Е. В., Токарев А. В., Павелко С. В., Тамбасов И. А. Расчет на прочность электромеханического блока устройства поворота батарей солнечных космического аппарата «Луна-Ресурс-1» 882

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Баранов М. Е., Герасимова Л. А., Хижняк С. В., Дубынин П. А., Клешнина И. А. Микробиология загрязненных соединениями азота почв 890

Власов А. Ю., Амельченко Н. А., Пасечник К. А., Титов М. А., Сержантова М. В. Статический и модальный анализ силовой конструкции прецизионного крупногабаритного антенного рефлектора из полимерных композиционных материалов 897

Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Михеев А. Е. Сравнительный анализ конструкций испытательных стендов для испытания карданных шарниров 902

Ермаков Д. В. Исследование корпуса двигателя-маховика, изготовленного по аддитивной технологии 910

Ермаков Д. В., Соловьев В. В. Балансировка малоразмерных двигателей-маховиков 918

Крушенко Г. Г., Платонов О. А., Решетникова С. Н., Киселев Г. Г. Изготовление и сварка алюминиевых сплавов нанопучковыми электродами 925

Левко В. А., Симакова А. Е., Савин Д. И. Повышение эффективности обработки абразивным потоком за счет управления факторами жизненного цикла рабочей среды 932

Лубкова Т. А., Бычек А. А., Попов З. И., Чепкасов И. В., Высотин М. А. Теоретический поиск и исследование магнитных фаз силицидов марганца на поверхности кремния (001) 939

Трифонов С. В., Морозов Е. А., Мурыгин А. В., Тихомиров А. А. Разработка технологии минерализации рыбных отходов в реакторе «мокрого» сжигания для замкнутых экосистем космического назначения 949

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Бабина О. И. Стратегическое планирование на мезоуровне: генезис, принципы, проблемы и методы 958

Ерыгин Ю. В., Волкова М. А. Включение региональной экономики в глобальные цепочки создания стоимости на основе государственного стимулирования инновационного развития 968

Подвербных О. Е., Краев В. М., Тихонов А. И. Современное управленческое образование инженерных кадров 976

Пучкин М. Б. Теоретические подходы к стратегическому управлению ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли 981

Сведения об авторах 993

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Abenova Zh. S., Petrov M. N. Research into the methods of software product developing and maintaining 706
Agafonov E. D., Shishkina A. V. On nonparametric control of a dynamic system 711
Gusev S. A., Nikolaev V. N. Numerical and statistical method for solving the heat exchange problems in the heat-protective constructions of the honeycomb type 719
Denisov M. A., Chzhan E. A. About parametric identification algorithms of discrete-continuous processes 727
Ivanov I. A., Brester C. Yu., Sopov E. A. Comprehensive method for multimodal data analysis based on optimization approach 736
Kovalev I. V., Losev V. V., Saramud M. V., Kovalev D. I., Petrosyan M. O., Brezitskaya V. V. To the question on implementation of multi-version execution environment software of onboard autonomous unmanned objects by means of real-time operating system 744
Kornet M. E., Orlova A. S. On nonparametric algorithms of object groups control 748
Medvedev A. V., Raskina A. V. On nonparametric identification and dual control of quasilinear dynamic processes 754
Mihov E. D. Using genetic programming techniques for inertia-free system identification tasks 764
Panfilova T. A., Panfilov I. A., Zolotarev V. V., Kovalev I. V., Sopov E. A. The operational model of a software system based on the GERT-network 773
Parot'kin N. Yu., Panfilov I. A., Zolotarev V. V., Kushko E. A., Panfilova T. A. Development and research of dynamic address space protocol on multicast-groups 779
Pashkovskaya O. V., Senashov S. I., Savostyanova I. L., Yuferova N. Yu. Modeling the cost of housing on the secondary real estate market in the city of Krasnoyarsk in 2016 788
Pyataeva A. V., Bandeev O. E. Video based flame detection algorithm 796
Raskina A. V. Comparative analysis of typical regulation algorithms and nonparametric dual control algorithm 804
Rogalev A. A. Algorithms of symbolic computations based on root trees for evaluating the capability of the control process 810
Ruchkin L. V., Ruchkina N. L. Modeling of the transformable mechanical systems 820
Sopova L. N., Chernova S. S. To the problem of nonparametric robust estimation of the regression function on observations 825

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Boyko O. G., Achkasova E. A. Modeling of the failure formation mechanism in non-recoverable and recoverable systems 834
Vshivkov J. F., Krivel S. M. Methodology and program complex of research of longitudinal static sustainability of screenplane at the design stage 841
Gordienko E. S., Platov I. V., Simonov A. V. The analysis of completed, ongoing and potential missions to the Jupiter system 851
Kazantsev Z. A. Deployment concept mechanical system of a radar antenna for space purposes 858
Kaloshin I. B., Kharlamov A. G., Skripachev V. O., Surovceva I. V., Ivanov V. K. System approach of selection to purpose designed equipment of small spacecraft 868
Latyntsev S. V., Meus S. V., Ovchinnikov A. V. The algorithm for estimating angular rate of spacecraft in survivability mode 876
Tambasova E. V., Tokarev A. V., Pavelko S. V., Tambasov I. A. Stress analysis of solar array driver mechanism actuator of the spacecraft "Luna-Resurs-1" 882

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Baranov M. E., Gerasimova L. A., Khizhnyak S. V., Dubynin P. A., Kleshnina I. A. Microbiology contaminated with nitrogen compounds of soils 890
Vlasov A. Y., Amel'chenko N. A., Pasechnik K. A., Titov M. A., Serzhantova M. V. Static and modal analysis of the power construction of the precision large-sized antenna reflector from polymer composite materials 897

Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovschikov V. A., Mikheev A. E. Comparative analysis of structures test apparatus for universal joint 902
Ermakov D. V. The study of the engine- flywheel housing made by additive technology 910
Ermakov D. V., Solovev V. V. Balancing small engines-flywheels 918
Krushenko G. G., Platonov O. A., Reshetnikova S. N., Kiselev G. G. Fabrication and welding of aluminum alloys by nanopackaging electrodes 925
Levko V. A., Simakova A. E., Savin D. I. The efficiency improving of abrasive flow machining on managing of the life cycle factors of media 932
Lubkova T. A., Bychek A. A., Popov Z. I., Chepkasov I. V., Visotin M. A. Theoretical search and investigation of magnetic manganese silicide phases on Si (001) surface 939
Trifonov S. V., Morozov E. A., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. Development of the technology for mineralization of fish waste in the “wet” combustion reactor for the CES intended for space flights 949

PART 4. ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

Babina O. I. Strategic planning at the mesolevel: genesis, principles, problems and methods 958
Erygin Y. V., Volkova M. A. Including regional economy in global value chains on the base of government stimulation of innovation development 968
Podverbnykh O. E., Kraev V. M., Tikhonov A. I. Up-to-date engineering management education 976
Poochkin M. B. Theoretical approaches to strategic management of TOSER in the nuclear industry ZATO 981

Information about the authors 997

Раздел
Part
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

UDC 001.8

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 706–710

RESEARCH INTO THE METHODS OF SOFTWARE PRODUCT DEVELOPING AND MAINTAINING

Zh. S. Abenova[1*], M. N. Petrov[2]

[1]JSC "National Company "Kazakhstan Gharysh Sapary"
National Space Centre, 89, Turan Av., Astana city, 010000, The Republic of Kazakhstan
[2]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: zhuza44@mail.ru

Currently the development of information and Open Source technologies for the implementation of critical business functions in fields of national economy, including space industry becomes relevant. However, as experience shows there is no uniform method for the process of developing and operating the software product using Open Source technology. The aim of the article is to study classical and modern models and technologies of software analysis and design. It will help choose the optimal model for the development of the method for creating a prototype information system using Open Source technology, and also to define the design environment and the tasks of implementing the prototype of the information system. The article considers a summary table which allows to choose efficient model for developing the method of building the information system, taking into account the specifics of the free software products.

Keywords: software, information system, model software development.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 706–710

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

Ж. С. Абенова[1*], М. Н. Петров[2]

[1]АО «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары»
Казахстан, 010000, г. Астана, просп. Туран, 89, Национальный космический центр
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: zhuza44@mail.ru

В настоящее время является актуальным развитие информационных технологий с применением технологий Open Source для реализации критически важных бизнес-функций в сферах народного хозяйства, в том числе космической отрасли. Однако, как показывает опыт, отсутствует единая методика процесса разработки и эксплуатации программного продукта с применением технологий Open Source. Целью статьи является изучение классических и современных моделей и технологий анализа и проектирования программных средств. Это позволит выбрать оптимальную модель для разработки методики по созданию прототипа информационной системы, использующую технологии Open Source, а также определить среду проектирования и задачи реализации прототипа информационной системы. Рассматривается сводная таблица, которая позволяет выбрать оптимальную модель для разработки методики построения информационной системы с учетом специфики свободных программных продуктов.

Ключевые слова: программное обеспечение (ПО), информационные системы, модель разработки ПО.

Introduction. Information technologies are one of most dynamic developing areas of science, technology and engineering, besides they are included in the list of critical technologies, which contributes to the improvement and continuity of new solutions, aimed at creating advanced information systems [1]. Therefore, the application of an integration environment of information cooperation (IEIC) based on Open Source technology in the aerospace segment is an actual solution that will solve the issues of information support in managing projects of various complexity and direction, regardless of the subject's location. IEIC system is the cheapest one and has all necessary functions and capabilities, taking into account tight budget and human resource constraints. In this respect, in order to form the information environment of the IEIC it is necessary to investigate the basic strategies and their models for the process of developing and putting into operation a software product. This will enable to choose the most effective design model of the IEIC system development, to define the design environment and to describe the project characteristics, the concept and the tasks of implementing the IEIC prototype [2].

Analysis of the efficient method selection for the IEIC system creation and development.
According to the Russian software development standards, there are three basic strategies: cascading, incremental and evolutionary models [3]. The cascading strategy is a linear sequential design approach for software development; the incremental strategy assumes that the requirements for the software product are implemented gradually, each time expanding a product utility; in the evolutionary strategy, the requirements are not fully defined, but are dynamically refined during the development of software product versions [4; 5].

Figure shows basic models of the basic software development strategy.

However, although there are many different models and ways of software products development, there is no single method that describes the Web resource development model using Open Source technologies, such as Development of IEIC. Therefore, to select a life cycle model Software Quality Institute in USA recommends to classify the project and to identify the main parameters that will be the key factor to select the model of software development [6]. These include:

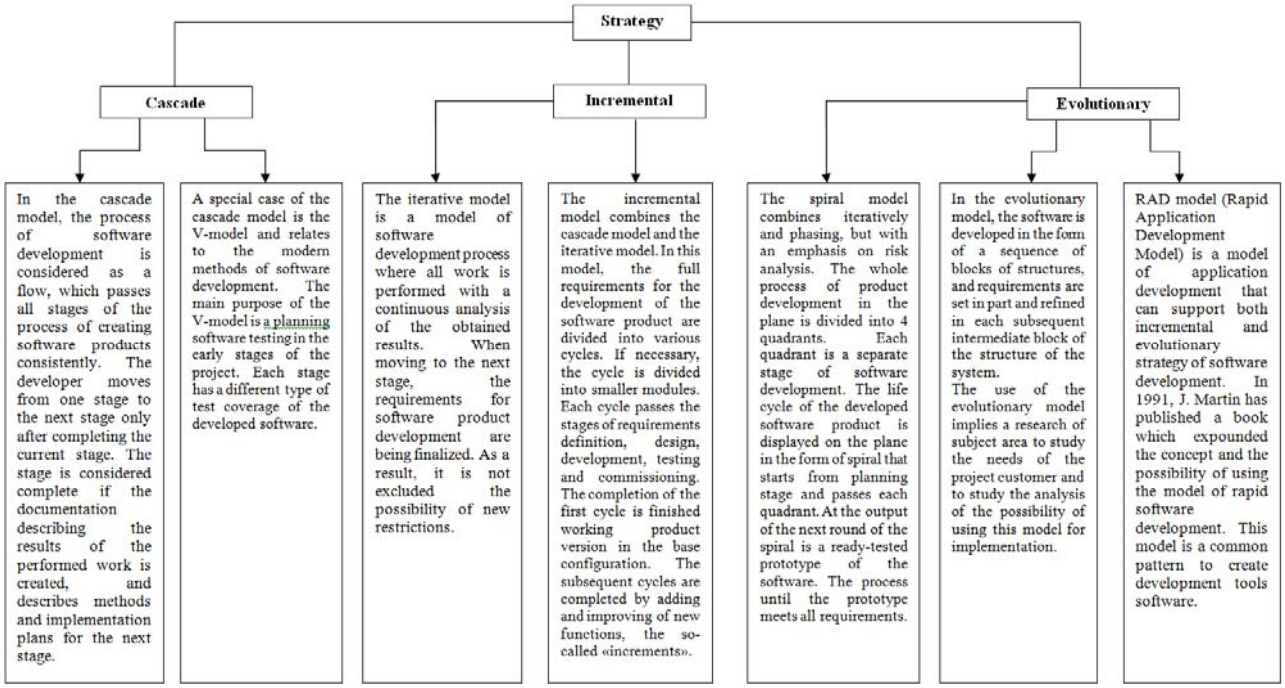
1. Requirement parameters for the project. This category can include the possibility to set up requirements for software at the beginning of the software life cycle, to determine the probability of changes and additions to the requirements for the software development lifecycle.

2. Parameters of the project working team. This category determines the novelty of technologies and the novelty of toolbox development for developers.

3. User profiles. This category identifies the degree of users involvement in the development process and their relationship to the project team, determines the degree of user involvement in the process of developing software and acquaintance of users with the problems in the process of the software life cycle.

4. Parameters of project types and risks. This category reflects the complexity of the project, estimates the resources for its execution, identifies problems in the software domain and determines requirements for reliability levels and other criteria [7].

Based on the above said a summary table that includes all categories of project parameters is suggested. Table will help to choose suitable model of software lifecycle for a particular project [8–10].



Software development models

Models of software engineering

№	Classification parameters	Model development of life cycle of the software product						
		Cascading	V-model	Iterative	Incremental	Spiral	RAD	Evolutionary
1	Are requirements for the project defined and feasible?	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
2	Can requirements for the project be determined at the beginning of the software life cycle?	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
3	Do you need to demonstrate requirements for clear understanding?	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes
4	Is it necessary to check the concept of the software product?	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes
5	Can the requirements be changed or added in the process of the software life cycle?	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes

End table

№	Classification parameters	Model development of life cycle of the software product						
		Cascading	V-model	Iterative	Incremental	Spiral	RAD	Evolutionary
6	Is there a need to implement requirements in the early stages of software development?	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
7	Are the tasks of the subject area of the project new to the project team?	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes
8	Are the tools for the implementation of the project new to the project team?	No	No	Yes	No	Yes	No	No
9	Can participants change roles in the process of software lifecycle development project?	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
10	Is in the process of the software lifecycle evolution and validation stage of software development needed?	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes
11	Will users participate in the process lifecycle?	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
12	Will users evaluate the current status of the software in the process of software development?	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
13	Will users be involved in all phases of the software life cycle development?	No	No	Yes	No	Yes	Yes	No
14	Will users track the progress of the project?	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes
15	Is the software being developed new to the company?	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
16	Will the project be an extension of the existing system?	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
17	Will the project be large-scale?	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
18	Will the project be medium or small-scale?	Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes
19	Will the product life cycle be long-lasting?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes
20	Is a high level of product reliability necessary?	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes
21	Is it planned to upgrade and develop the product during the operation phase?	No	No	No	Yes	No	No	Yes
22	Is the timetable tight?	No	No	No	Yes	No	Yes	Yes
23	Will the functions and modules be reused?	Yes	No	No	Yes	No	Yes	Yes
24	Is the project budget tight?	No	No	No	No	No	No	Yes
25	Are the software developers sufficiently competent?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
26	Can costs be required to purchase additional equipment and tools for project implementation?	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
27	Can additional costs be required to attract highly qualified employees?	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes
28	Have such software products been implemented in the enterprise before?	Yes	No	No	No	No	Yes	No
29	Will new technologies or new approach be used in the development process?	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes
30	Is it necessary to conduct analysis of existing technologies for software development?	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
31	Is it necessary to develop a prototype of the software product in the early stages of the product life cycle?	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
32	Is the software unique?	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes
33	Is the software part of the system?	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No
34	Is the software a stand-alone solution?	No	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes

According to table the cascade model is more suitable when the requirements are known, straightforward and documented, and there are no problems with the availability of programmers of necessary qualifications [11–13]. This model can be used in relatively small projects, in the redevelopment of typical software (for example, the development of an electronic document management, accounting system, etc.). The cascading model can be used in case of migrating of existing software to a new platform or when launching a new version of software if the changes are minor and clearly defined. The advantage of this model is that each stage is completed with certain documentation that meets the criteria of completeness and consistency. Therefore, there is no need to return to the previous stages. All work is performed in strict order. This approach allows to schedule deadlines, and accordingly plan the costs of each stage in advance. The disadvantage of the model is the complexity of switching between stages [14].

The V-model fits better when requirements are defined and documented, thorough testing is required. The model is suitable for medium and small-scale projects,

provided that qualified programmers, including testers are involved. The advantages of this model include requirements setting prior to development, tests planning and system verification at the early stages of software development, special importance is given to time management. However, there are disadvantages: the model does not imply the work with parallel events; there is no possibility to introduce requirements for dynamic changes at different stages of the software life cycle. The model can be used mainly in projects with tight time or financial constraints, also in such projects where there is an extensive coverage of the test tasks.

The iterative model can be used for large-scale projects, when the requirements for the final system are clearly defined and understood, but can be modified over time. That is, the model implies that the main task must be defined, and implementation details may change during the development of the software product over time.

The incremental model is the most suitable when basic requirements for the system are clearly defined and if the software needs early introduction on the market, however, there is a possibility of revision over time. This model can be used in long-term projects at low or medium risks. Also, the model is suitable for projects where new technology can be applied. This will allow the user to adapt to the software product being developed by executing smaller incremental steps at specific time intervals. The advantage of this model is that the result of each increment is the working functional product and a customer has the opportunity to evaluate each developed version of the software. Firstly, it is supposed to develop and implement the main function of the platform in the model and only then increase it. This will reduce the risks of failures and risks of over-expenditures, as the main functionality of the system can be determined at the early stages of development. The disadvantages of the model include the fact that at the initial stage it can be difficult to define a complete efficient system which makes it difficult to make up the increments.

The spiral model is suitable for complex and expensive projects, where it is required to carry out analysis for impact evaluation after each step. If software development involves the use of new technology and success is not guaranteed, then the spiral model should also be used. This model is appropriate for development of new series of software products, where it is important to analyze the risks and costs. In the model it is possible to return to the left behind stages to reflect over the changes in costs of risks. The advantages of the model include step by step specification requirements and conducting a risk analysis of the project, which allow to identify design errors at the early stages of software development, creation of working prototypes at the early stages and availability of completed software development process documentation, as well as the ability to add new features even at the later stages of the software life cycle. A complex project can be developed in parts, highlighting the most important requirements at different stages. The disadvantages of the spiral model include the dependence of success of the development process on the stage of risk analysis and high cost of software development, because risk management requires the involvement of sufficiently qualified specialists.

The RAD model can be used only in the presence of highly qualified specialists as this model is suitable for confident knowledge of the target business and the need for urgent production of system [15]. This model is appropriate for projects where the budget is large, in order to pay for professional service. Also, this model can be used in projects where there is very little risk; the software product being developed can be modeled and has relatively low performance; and when it is required to minimize duration of software product development. The advantages of this model include reduction of the cycle time and the number of developers by using powerful tools. Already in the early stages of software development a prototype of product, which further increases the efficiency of the developed components, is created. The disadvantages include rigid time management for software development, and the need to attract highly qualified professionals who are able to work with the necessary software tools.

In the evolutionary model, requirements for the software product can be specified gradually. The main emphasis is put on the development of the software prototype, then a complete understanding of product requirements. The advantages of this model are:

– identification of software utility at the initial stage;
– staff recruitment on demand;
– dividing of system into incremental components.

The disadvantages of this model are limited opportunities for long-term resource mobilization [3; 9].

Conclusion. Analysis the best model selection determined the evolutionary model as the most suitable one for the IEIC development. Advantages of the evolutionary model include the fact that the product is developed in the form of separate designs, but unlike the incremental model, requirements cannot be initially determined completely. In this model, specification of requirements is allowed partially and is specified with each subsequent design. Since the specificity of the development of the IEIC platform lies in the fact that at the initial stage there are no exact formulations for the platform requirements, so accordingly, there are no specific tasks for the development of the IEIC, and there is no unified design for commissioning of similar systems developed with the help of the Open source technology. In this regard based on the processes of the evolutionary model, it is necessary to work out a methodology for constructing the IEIC, taking into account the specifics of the web resource and free software products development, and for the existing technologies analysis, their functions and characteristics for developing and maintaining the IEIC.

References

1. Software Development Methodology Today. Software Development Strategies and Life-Cycle Models [Electronic source]. URL : http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=605374&seqNum=2 (accessed October 16, 2017).

2. Inyushkina O. G. *Proektirovanie informatsionnykh sistem (na primere metodov strukturnogo sistemnogo*

analiza) [Designing information systems (using the methods of structural system analysis)]. Ekaterinburg, Fort-Dialog Iset' Publ., 2014, 240 p.

3. State Standard 15271–2002. Information technology. Guide for the application of GOST R ISO/IEC 12207 (Software life cycle process). Moscow, Standartinform Publ., 2004. 45 p.

4. STB ISO/IEC 12207–2003. Information technology. Software life cycle processes. Minsk, Gosstandart Respubliki Belorus', 2003. 52 p.

5. State Standard 12207–2010. Information technology. System and software engineering. Software life cycle process. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 100 p.

6. State Standard 9126–93. Information technology. Software product evolution. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 13 p.

7. STB ISO/IEC 9126–2003. Information technology. Software product evolution. Quality characteristics and guidelines for their use. Minsk, Gosstandart Respubliki Belorus', 2003. 16 p.

8. Kaner S. at al. *Testirovanie programmnogo obespecheniya. Fundamental'nye kontseptsii menedzhmenta biznes-prilozheniy* [Software testing. Fundamental concepts of business application management]. Kiev, DiaSoft Publ., 2001, 544 p.

9. Bakhtizin V. V. *Tekhnologiya razrabotki programmnogo* [Software development technology]. Minsk, BGUIR Publ., 2010, 267 p.

10. Vendrov A. M. *Proektirovanie programmnogo obespecheniya ekonomicheskikh informatsionnykh sistem* [Designing of software for economic information systems]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2005, 544 p.

11. Marka D. *Metodologiya strukturnogo analiza i proektirovaniya SADT* [Methodology of structural analysis and design]. Moscow, MetaTehnologiya Publ., 2003, 243 p.

12. Orlov S. *Tehnologiya razrabotki programmnogo obespecheniya* [Technology software development]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2002, 464 p.

13. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK). – Upper Darby: PMI Standards Committee. 1996. Available at: http://www.softwareresearch.net/fileadmin/src/docs/teaching/SS06/PM/PMBOKINTRO.pdf (accessed 17/11/2017).

14. Bijay K. Jayaswal, Peter C. Patton. Software Development methodology today. September 22, 2006. Available at: http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=605374&seqNum=2 (accessed 17/11/2017).

15. Kupriyanov A. V. *Tekhnologii proektirovaniya programmnykh produktov* [Software design technology]. Samara, Publishing house of the Samara State Aerospace University, 2006, 72 p.

Библиографические ссылки

1. Software Development Methodology Today. Software Development Strategies and Life-Cycle Models [Электронный ресурс]. URL: http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=605374&seqNum=2 (дата обращения: 16.10.2017).

2. Инюшкина О. Г. Проектирование информационных систем (на примере методов структурного системного анализа) : учеб. пособие. Екатеринбург : Форт-Диалог Исеть, 2014. 240 с.

3. ГОСТР ИСО/МЭК ТО 15271–2002. Информационная технология. Руководство по применению ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207 (Процессы жизненного цикла программных средств). М. : Изд-во стандартов, 2004. 45 с.

4. СТБ ИСО/МЭК 12207–2003. Информационные технологии. Процессы жизненного цикла программных средств. Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2003. 52 с.

5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207–2010. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. М. : Изд-во стандартов, 2004. 100 с.

6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126–93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. М. : Изд-во стандартов, 2004. 13 с.

7. СТБ ИСО/МЭК 9126–2003. Информационные технологии. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. Минск : Госстандарт Республики Белорусь, 2003. 16 с.

8. Канер С., Фолк Дж., Нгуен Енг Кек. Тестирование программного обеспечения. Фундаментальные концепции менеджмента бизнес-приложений : пер. с англ. Киев : ДиаСофт, 2001. 544 с.

9. Бахтизин В. В. Технология разработки программного обеспечения : учеб. пособие. Минск : БГУИР, 2010. 267 с.

10. Вендров А. М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Финансы и статистика, 2005. 544 с.

11. Марка Д. А., МакГоуэн К. SADT. Методология структурного анализа и проектирования. М. : Мета-Технология, 2003. 243 с.

12. Орлов С. Технология разработки программного обеспечения : учебник. СПб. : Питер, 2002. 464 с.

13. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK) [Электронный ресурс]. Upper Darby: PMI Standards Committee. 1996. URL: http://www.softwareresearch.net/fileadmin/src/docs/teaching/SS06/PM/PMBOKINTRO.pdf (дата обращения: 17.11.2017).

14. Jayaswal B. K., Patton P. C. Software Development methodology today [Электронный ресурс]. 2006. September 22. URL: http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=605374&seqNum=2 (дата обращения: 17.11.2017).

15. Куприянов А. В. Технологии проектирования программных продуктов : учеб. пособие. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосмич. ун-та, 2006. 72 с.

© Abenova Zh. S., Petrov M. N., 2017

UDC 52-601

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 711–718

ON NONPARAMETRIC CONTROL OF A DYNAMIC SYSTEM

E. D. Agafonov[1], A. V. Shishkina[2*]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
26b, Academica Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
[*]E-mail: nastya.shishkina9666@mail.ru

The paper considers the problem of dual control of an inertia-free object whose input is affected by a control variable and an observable but uncontrollable variable. The idea of dual control belongs to A. Feldbaum and was developed on the basis of Bayesian approach. In this case, the probability densities of interference, as well as input output variables are known. In particular, the case of Gaussian probability densities was investigated. As a result, algorithms of dual control with the simplest objects of the inertia-free class were obtained. In the case of combined control systems, these studies were carried out by Feldbaum's followers.

Further development of dual control theory was described by Y. Tsypkin. The probability density of the interference was unknown, but the stage of selecting the structure of the control device and the equation of the describing object were necessary. In Tsypkin's works, the corresponding parametric algorithms for dual control are given. In this case, a simultaneous estimation of the coefficient of the model and the regulator was made on the basis of the method of stochastic approximations.

Later on nonparametric dual control algorithms were proposed. It is this way of control design that is discussed in the current paper. The parametric model of the object and the parametric structure of the controller were unknown in the problem statement. Nevertheless, it was known from a priori information that the characteristic of the object was one-to-one in control. Below we consider nonparametric control algorithms that combine the processes of simultaneous control and the study of the object with an accuracy of the structure unknown to the parameters, but a priori with a given number of delayed elements of the output variable of the object. In other words, the depth of the memory of the managed object was determined. In this case, a nonparametric algorithm for dual control can function in conditions of passive and active accumulation of information. The technique for representing a one-dimensional inertial-free dynamic system to a multidimensional static one is presented in the paper. Some results of numerical investigation of nonparametric algorithms of dual control are also presented.

Keywords: object with memory, dual control, combined system, nonparametric algorithms, bandwidth parameter, parameter setting.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 711–718

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Е. Д. Агафонов[1], А. В. Шишкина[2*]

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26б
[*]E-mail: nastya.shishkina9666@mail.ru

Рассматривается задача дуального управления безынерционным объектом, на вход которого действует управляющая переменная и неуправляемая, но контролируемая переменная. Идея дуального управления принадлежит А. А. Фельдбауму и была развита на основе байесовского подхода, в этом случае плотности вероятности помех, а также входных-выходных переменных известны, в частности, исследовался случай гауссовых плотностей вероятностей. В результате были получены алгоритмы дуального управления с самыми простыми объектами класса безынерционных. На случай комбинированных систем управления эти исследования проводились его последователями.

Дальнейшее развитие теории дуального управления описывается в книге Я. З. Цыпкина, где плотность вероятности помех уже неизвестна, но также необходим был этап выбора структуры управляющего устройства и уравнения описывающего объекта. В работах Цыпкина приведены соответствующие параметрические алгоритмы дуального управления. В этом случае осуществлялась одновременная оценка коэффициента модели и регулятора на основе метода стохастических аппроксимаций.

Несколько позже были предложены непараметрические алгоритмы дуального управления. Именно этот путь и рассматривается в настоящей статье. Здесь уже не известна ни параметрическая модель объекта, ни параметрическая структура регулятора. Тем не менее, из априорных сведений известно, что характеристика объекта является взаимно однозначной по управлению. Рассматриваются непараметрические алгоритмы управления, совмещающие процессы одновременного управления объектом и его изучения с точностью неизвестной до параметров структуры, но априори с заданным числом запаздывающих элементов выходной переменной объекта. Иными словами, глубина памяти управляемого объекта определена. В этом случае непараметрический алгоритм дуального управления может функционировать в условиях пассивного и активного накопления информации. Приведена методика представления одномерной безынерционной динамической системы к многомерной статической. Представлены также некоторые результаты численного исследования рассматриваемых непараметрических алгоритмов дуального управления.

Ключевые слова: объект с памятью, дуальное управление, комбинированная система, непараметрические алгоритмы, параметр размытости, настройка параметров.

Introduction. The problem to be solved in the paper is the design and implementation of nonparametric control algorithms. An object under control is assumed to be inertia-free and it is described by an equation with an unknown structure with respect to its parameters. Together with the control effect the object is influenced by uncontrollable but observable input. The nonparametric dual control algorithms under consideration were investigated for various tactics of determining the bandwidth parameters at each clock cycle. A concept of dual control was created by A. Feldbaum [1] and developed by Y. Tsypkin [2]. It was originally intended for Bayes control problem statement when the object under control was inertia-free. The main idea of the concept was simultaneous control and learning of the object. That involves procedures of parametric identification [3] together with implementation of control methods in the parametric formulation [4–7]. It should be noted that a dual control system is an example of a control device with memory.

Problem statement. The following notations are introduced: let $x = (x_1 \dots x_n) \in R^n$ be output of the object, $u = (u_1 \dots u_k) \in R^k$ be controlled input effect, $\mu = (\mu_1 \dots \mu_m) \in R^m$ be uncontrollable but observable input, and $x^* = (x_1^* \dots x_n^*) \in R^n$ be reference of the object under control (fig. 1) [8].

In fig. 1 the control device is denoted by '*yy*', the object under control is denoted by '*O*', and random stationary noise effects influencing both the object itself and the object measurement channels are denoted by ξ_t, h_t. We assume these noise effects to be unbiased and to have limited variance. The unknown model curve of the object $x = f(u, \mu)$ is assumed to be one-to-one with respect to control effect $u \in \Omega(u) \in R^k$ for the fixed vector $\mu \in \Omega(\mu) \in R^m$ in the feasible domain of $u \in \Omega(u)$.

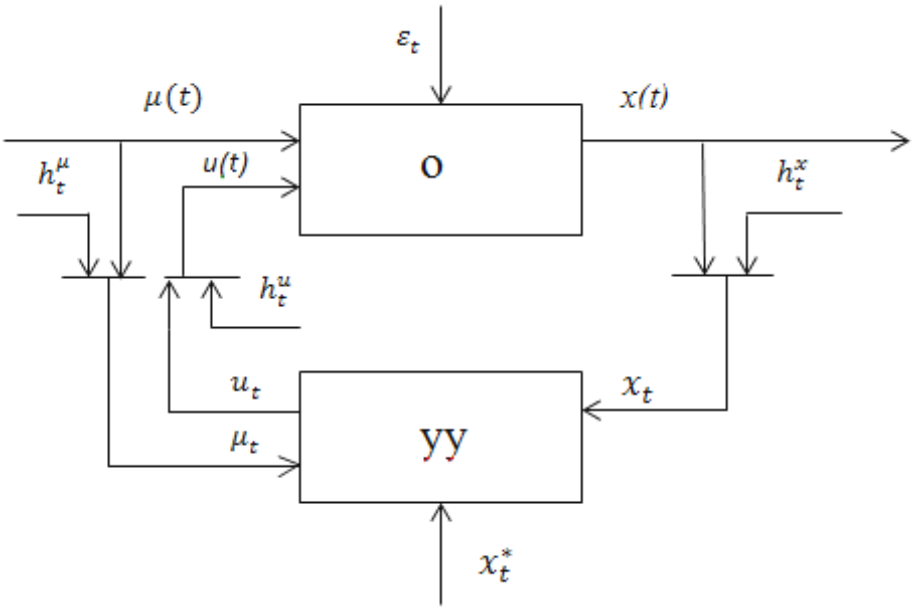


Fig. 1. The scheme of a nonparametric control system, where (*t*) denotes continuous time, and the subscript *t* indicates discreet time moments of measurements

Рис. 1. Схема непараметрической системы управления:
t – непрерывное время; *t* в качестве индекса – дискретное время контроля измерения

Nonparametric combined control algorithms. A nonparametric control algorithm is based upon Nadaraya and Watson [9] nonparametric estimates of regression. A nonparametric dual control algorithm in the form [10] for a single-input case is represented by the expression:

$$u_{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^{t} u_i \Phi\left(\frac{x_{t+1}^* - x_i}{c_t^x}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{t+1} - \mu_i}{c_t^\mu}\right)}{\sum_{i=1}^{t} \Phi\left(\frac{x_{t+1}^* - x_i}{c_t^x}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{t+1} - \mu_i}{c_t^\mu}\right)} + \Delta u_{t+1}, i = \overline{1,t}. \quad (1)$$

For the multiple-input object a nonparametric dual control algorithm can be expressed by

$$u_{t+1}^\eta = \frac{\sum_{i=1}^{t} u_i^\eta \prod_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{x^{*j} - x_i^j}{c_t^x}\right)\prod_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{\mu^j - \mu_u^j}{c_t^\mu}\right)}{\sum_{i=1}^{t} \prod_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{x^{*j} - x_i^j}{c_t^x}\right)\prod_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{\mu^j - \mu_u^j}{c_t^\mu}\right)} + \Delta u_{t+1}, \quad (2)$$

$$\eta = \overline{1,k},$$

where u_i are learning sample elements, $\Phi(\cdot)$ is a kernel function with the following features:

$$0 \le \Phi(\cdot) < \infty;\ \frac{1}{c_t}\int \Phi\left(\frac{x}{c_t}\right)dx = 1;\ \lim_{t\to\infty}\frac{1}{c_t}\Phi\left(\frac{x}{c_t}\right) = \delta(x);$$

v is an arbitrary argument; c_t^x, c_t^μ are bandwidth parameters that satisfy the following convergence conditions [8; 10]:

$$c_t > 0;\ \lim_{t\to\infty} tc_t \to \infty;\ \lim_{t\to\infty} c_t \to 0.$$

Estimate (1) is control algorithm for a combined system described by the following equation:

$$x_t = f(u_t, \mu_t, \xi_t), \quad (3)$$

where the shape of the function $f(\cdot)$ is unknown, but we know that $f(\cdot)$ is a continuous one-to-one stationary function up to its arguments [11].

A single-dimension nonparametric dual algorithm functioning can be explained as follows. A learning process begins with the first ternary of observed variables: x_1, u_1, μ_1. The initial stage of the control process is mostly concentrated on active accumulation of information in order to bring the object to the target state.

Here two key problems should be solved: how to fit bandwidth parameters c_t^x and c_t^μ, and which of them should be found first.

The bandwidth parameter c_t^x is found by means of the weighted residual calculation [12–14]:

$$c_t^x = l_1 \left| x_t^* - x_t^0 \right|, \quad (4)$$

where $x_t^0 = \min_i \left| x^* - x_i \right|, i = \overline{1,t},$ and coefficient $l_1 > 1$. After repeating the control process ρ times one receives the data set $\{x_i, u_i, \mu_i\}, i = \overline{1,\rho}$.

Further we reduce the set $\{x_i, u_i, \mu_i\}, i = \overline{1,\rho}$ taking into consideration only measurements that satisfy the following condition:

$$c_t^\mu = l_2 \left| \mu_{t+1} - \mu_\rho^0 \right|, \quad (5)$$

where l_2 is a coefficient to be found experimentally: $l_2 > 1$. μ_ρ^0 is found from the optimization process $\mu_\rho^0 = \min_i \left| \mu - \mu_i \right|, i = \overline{1,\rho}$. Finally we get a new reduced data set $\{x_i, u_i, \mu_i\}, i = \overline{1,s},$ whose size s satisfies the inequality $s < \rho$.

Judging from our experience, the algorithm (1) is insensitive to the sequence of c_t^x and c_t^μ bandwidth parameters fitting.

Let us pay attention to learning process of the nonparametric dual control algorithm. It was discussed in [10], and is represented by the iterative scheme:

$$u_{t+1} = u_t^* + \Delta u_{t+1}. \quad (6)$$

Information about the object under control is contained in u_t^*, and learning capabilities are fulfilled by the search additive Δu_{t+1}:

$$\Delta u_{t+1} = \alpha\left(x_{t+1}^* - x_{t+1}\right), \quad (7)$$

where α is a coefficient defining search amplitude that should be fitted. We require that $\Delta u_{t+1} \to 0$ with the growth of t.

It is a well-known fact that the output of a discrete dynamic object can be represented as follows [3]:

$$x_t = f(x_{t-1} \ldots x_{t-k}, u_t). \quad (8)$$

In this case $x_{t-1} \ldots x_{t-k}$ can be interpreted as supplementary incontrollable inputs in terms of previously introduced static object modeling routine. Fig. 2 describes the approach.

In fig. 2 the following notations are given: x_t^* is a reference output variable of the object; t with round brackets is a continuous time variable; subscript t denotes discrete time indices; h_t^u, h_t^x are random noise in measurement channels corresponding to the variables of the object; $\xi(t)$ is an unobservable random effect.

Thus, for the uncontrollable but observable variable x_{t-i}, $i = \overline{1,k}$ as the input effect of the object the algorithm (1) can be rewritten in the following form [15]:

$$u_{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^{t} u_i \Phi\left(\frac{x_{t+1}^* - x_i}{c_t^x}\right)\prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_{t-j} - x_{i-j}}{c_t^x}\right)}{\sum_{i=1}^{t} \Phi\left(\frac{x_{t+1}^* - x_i}{c_t^x}\right)\prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_{t-j} - x_{i-j}}{c_t^x}\right)} + \Delta u_{t+1}, i = \overline{1,t}. \quad (9)$$

A general control theory of similar objects control is explicated in [2]. Implementation of the corresponding dual control algorithms can be found in [16; 17]. Below we will focus on numerical experiments with a nonparametric dual control algorithm (9). During the experiments the object under control will be substituted by either an inertia-free (memory-free) operator or a dynamic operator.

It should be noted that the control algorithm does not possess information on the equation (operator) of the object under control excepting the type of the operator. The use of dual control algorithms is presented in [16; 17].

Numerical experiments. To perform the first batch of numerical experiments the object was substituted by the expression

$$x_{t+1} = u_{t+1} + \mu_{t+1}, \qquad (10)$$

where $x(t)$ is an output variable; $u(t)$ is a controllable input; $\mu(t)$ is observable but uncontrollable effect, taken as the process

$$\mu_t = 0.5 + 0.3\sin(0.2t). \qquad (11)$$

The control procedure starts with the first point (x_1, u_1, μ_1). Further data accumulation results in active learning of the control algorithm. As a consequence the object can be more effectively driven to a reference state or follow a reference trajectory.

Functioning of a nonparametric control algorithm is illustrated by fig. 3 and 4. A particular experiment was conducted to demonstrate the ability to follow the stepwise reference trajectory $x^*(t)$.

Fig. 4, *a* shows an enlarged scale of reference $x^*(t)$ and control $x(t)$ processes depicted in fig. 4, *b*. A nonparametric dual control algorithm can effectively solve the control problem even for a noticeable level of noise. The case when random noise with amplitude up to 3 % of the output value is presented in fig 5.

Let the reference to the control process be given by the expression $x_t^* = 2 + \sin(0.1t)$. For the case the corresponding control process is depicted in fig. 6.

Except stepwise functions and continuous reference functions one can construct other references using even random functions. To illustrate capabilities of the control algorithm (1) to follow random reference the following experiment was carried out (fig. 7). x_t^* is defined here as a sequence of sine function and purely random effect evenly distributed in the interval [0.5; 2.5].

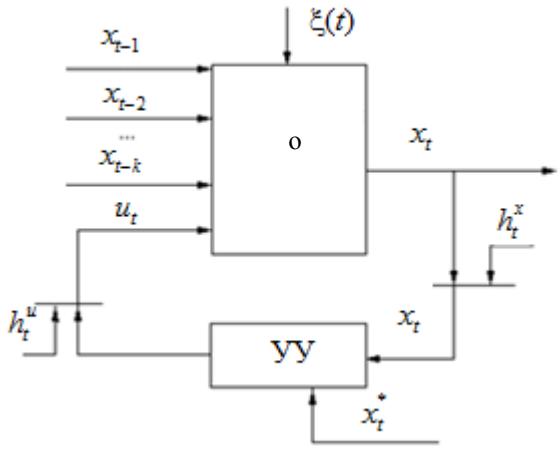


Fig. 2. A control scheme for an object with memory (dynamic object)

Рис. 2. Управление объектом с памятью

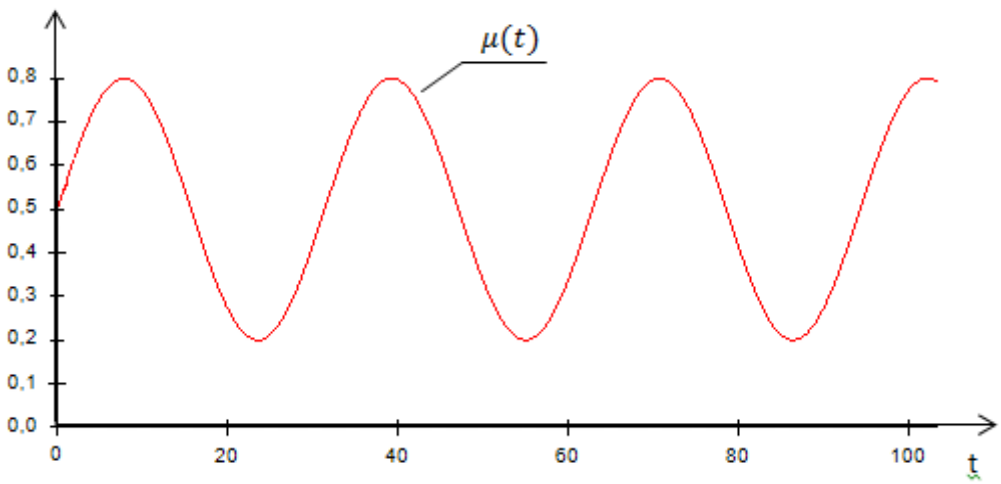
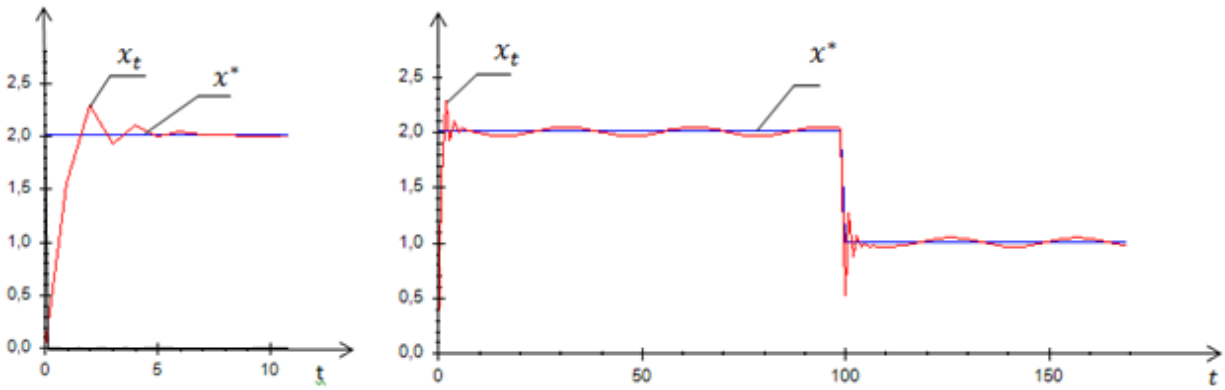


Fig. 3. Uncontrollable effect $\mu(t)$

Рис. 3. Неуправляемое входное воздействие



a *b*

Fig. 4. Control process for a stepwise reference value

Рис. 4. Управление при задающем воздействии в виде ступенчатой функции

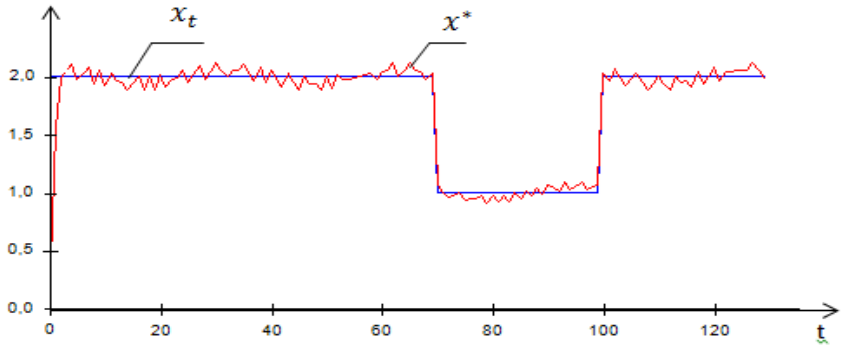


Fig. 5. Control process in case of 3 % random noise applied to the object output

Рис. 5. Управление при задающем воздействии с помехой

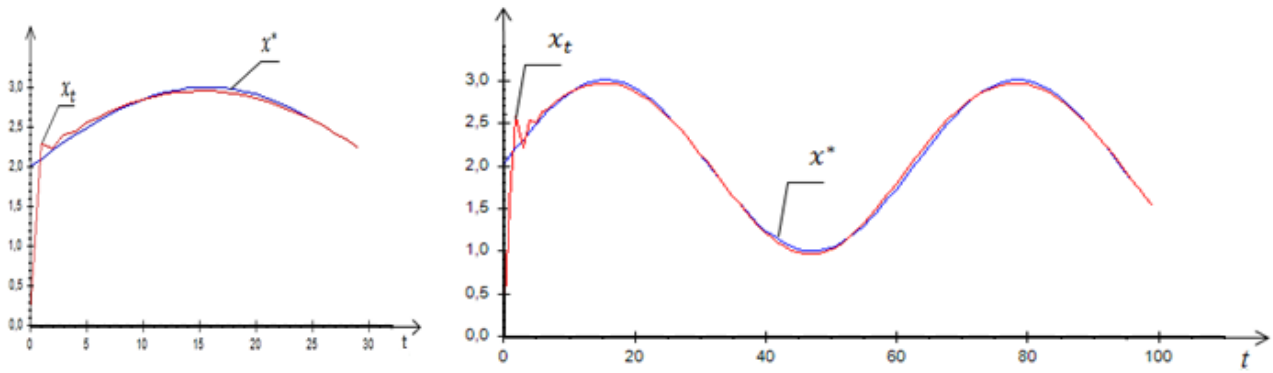


Fig. 6. Control process for continuous reference

Рис. 6. Управление при задающем воздействии в виде траектории

Experiments with the control algorithm operation make it evident that it is able to deal even with random references. On the contrary, standard P, PI, PID controllers cannot reach the level of control quality, because they are not based on data accumulation and analysis. Moreover, settling time is expected to be much worse for the controllers.

The control process in fig. 7 demonstrates satisfactory quality. That is an exceptional functionality of the control algorithm (1) can be noticed. It should be noted that none of already existing controllers can reach the same level of control accuracy and velocity.

Let us take into consideration another case when the object is represented by the dynamic operator (8). The equation is accepted in the form of the first-order discrete operator:

$$x_t = f\left(x_{t-1}, u_t\right). \tag{12}$$

Particularly, the linear first-order object is described by

$$x_t = \beta_1 u_t + \beta_2 x_{t-1}, \tag{13}$$

where β_1 and β_2 are finite constants.

For the case we describe peculiarities of the control procedure. The learning process begins with a pair of measurements, namely (x_0, u_0) and (x_1, u_1). The initial phase of control is devoted to data accumulation needed to bring the object to the target state. Further, time to reach the target diminishes to a great extent.

Let us demonstrate functioning of the algorithm (9). Let control reference be a stepwise function. Control process for the reference is depicted in fig. 8.

Fig. 9 demonstrates functioning of the algorithm when reference is a combination of a sine function and a random function. Again, the control process can be qualified as highly effective.

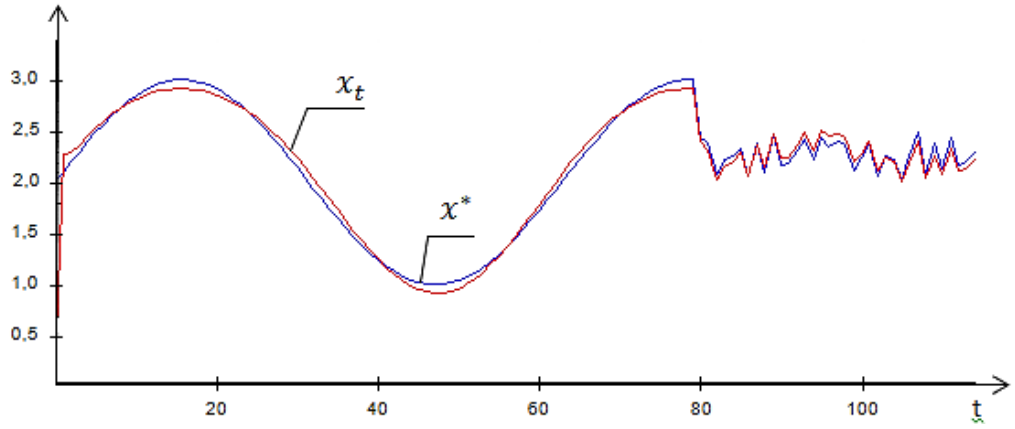


Fig. 7. Control procedure for combined reference containing random noise

Рис. 7. Управление при задающем воздействии в виде траектории и случайного задания

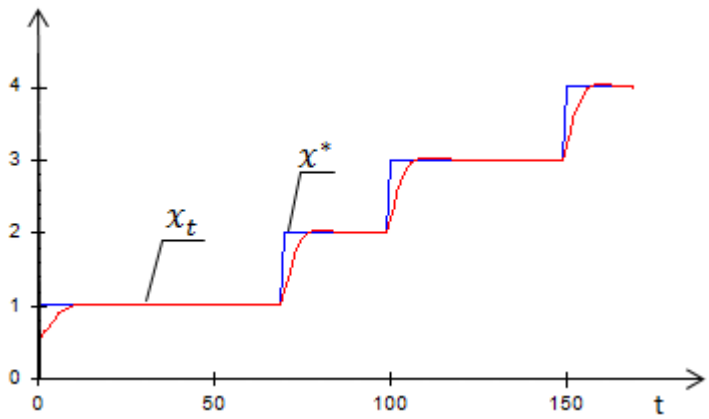


Fig. 8. Control process in case of stepwise reference

Рис. 8. Управление при задающем воздействии в виде ступенчатой функции

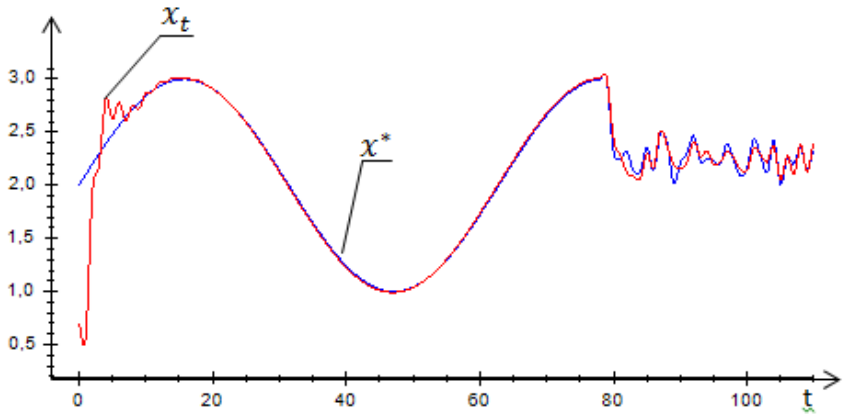


Fig. 9. A random reference test for dynamic system dual control

Рис. 9. Результаты управления при случайном задании

Thus, the algorithm (9) is able to control a dynamic object with memory, providing good quality due to data accumulation and proper model-based control synthesis.

Conclusion. The problem of dynamic system control in case of nonparametric uncertainty conditions is discussed in the paper. After re-designation of object variables this problem can be reformulated in terms of multidimensional inertia-free object control. Bandwidth determination techniques for both controllable and uncontrollable input effects are proposed. Two variants of nonparametric control algorithm learning are discussed. Illustrations of some numerical experiments with the algorithm prove that it can be used in various computer-added systems of adaptive control. The key point of the algorithm is the capability to control continuous production processes with discrete-time measurement equipment.

References

1. Feldbaum A. A. *Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh system* [Fundamentals of the Theory of Optimal Automatic Systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.
2. Tsypkin Ya. Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and Training in Automatic Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.
3. Eykhoff P. System Identification: Parameter and State Estimation. Chester, England: Wiley, 1974, 555 p.
4. Voronov A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chast' 1: Lineynye sistemy regulirovaniya odnoy velichiny* [Fundamentals of Automatic Control Theory. Part 1: Linear Control Systems of Single Variable]. Moscow–Leningrad, Energy Publ., 1965, 396 p.
5. Voronov, A. A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chast' 2: Spetsial'nye lineynye i nelineynye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya odnoy velichiny* [Fundamentals of Automatic Control Theory. Part 2: Special Linear and Nonlinear Automatic Control Systems of Single Variable]. Moscow-Leningrad, Energy Publ., 1966, 364 p.
6. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 3: Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of Classical and Modern Automation Control Theory. Vol. 3: Synthesis of Controllers in Automation Control Systems]. Moscow, MSTU Publ., 2004, 616 p.
7. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 4: Teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of Classical and Modern Automation Control Theory. Methods of the classical and modern theory of automatic control. Vol. 4: The Optimization Theory of Automation Control Systems]. Moscow, MSTU Publ., 2004, 742 p.
8. Medvedev A. V. *Adaptatsiya v usloviyakh neparametricheskoy neopredelennosti Adaptivnye sistemy i ikh prilozheniya* [Adaptation in Conditions of Nonparametric Uncertainty. Adaptive Systems and Their Applications]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, P. 4–34.
9. Nadaraya E. A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroyatnostey i krivoy regressii* [Nonparametric Estimation of the Probability Density and the Regression Function]. Tbilisi, Tbil. Univ. Publ., 1983, 194 p.
10. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnykh sistem* [Fundamentals of Adaptive Systems Theory]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2015, 526 p.
11. Vasil'ev V. A., Dobrovidov A. V., Koshkin G. M. *Neparametricheskoe otsenivanie funktsionalov ot raspredeleniy statsionarnykh posledovatel'nostey* [Nonparametric Estimation of Functionals from Distributions of Stationary Sequences]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 512 p.
12. Bannikova A. V., Medvedev A. V. [On Nonparametric Control Algorithms for a Dynamic System]. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh* [Control Problems and Modeling in Complex Systems]. Samara, 2014, P. 15–21 (In Russ.).
13. Medvedev A. V. [The Theory of Nonparametric Systems. Control – I]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 2 (48), P. 57–63 (In Russ.).
14. Medvedev A. V. [The Theory of Nonparametric Systems. Control – II]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3 (49), P. 85–90 (In Russ.).
15. Medvedev A. V. [Elements of the theory of Nonparametric Control Systems]. *Aktual'nye problemy informatiki, prikladnoy matematiki i mekhaniki. V 3 ch. Ch. III Informatika*. Novosibirsk-Krasnoyarsk: Sib. Brunch of Ros. Acad. Sci., 1996, P. 87–112.
16. Wenk C. J., Bar-Shalom Y. A. Multiple Model Adaptive Dual Control Algorithm for Stochastic Systems With Unknown Parameters. *Automatic Control, IEEE Transactions.* 2003, Vol. 25, Iss. 4, P. 703–710.
17. Tse E. Bar-Shalom, Y. An Actively Adaptive Control for Linear Systems With Random Parameters via the Dual Control Approach. *Automatic Control, IEEE Transactions*. 2003, Vol. 18, Iss. 2, P. 109–117.

Библиографические ссылки

1. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.
2. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.
3. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 683 с.
4. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 1. Линейные системы регулирования одной величины. М. ; Л. : Энергия, 1965. 396 с.
5. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 2. Специальные линейные и нелинейные системы автоматического регулирования одной величины. М. ; Л. : Энергия, 1966. 364 с.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник. В 5 т. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 616 с.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 т. Т. 4. Теория оптимизации систем автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 742 с.
8. Медведев А. В. Адаптация в условиях непараметрической неопределенности. Адаптивные системы и их приложения. Новосибирск : Наука. СО АНСССР, 1978. С. 4–34.

9. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1983.

10. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем. Красноярск, 2015. 526 с.

11. Васильев В. А., Добровидов А. В., Кошкин Г. М. Непараметрическое оценивание функционалов от распределений стационарных последовательностей. М. : Наука, 2004.

12. Банникова А. В., Медведев А. В. О непараметрических алгоритмах управления динамической системой // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : Тр. XVI Междунар. конф. Самара, 2014. С. 15–21.

13. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – I // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 57–63.

14. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – II // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 3 (49). С. 85–90.

15. Медведев А. В. Элементы теории непараметрических систем управления // Актуальные проблемы информатики, прикладной математики и механики. В 3 ч. Ч. 3. Информатика. Новосибирск ; Красноярск : Изд-во СО РАН, 1996. С. 87–112.

16. Wenk C. J., Bar-Shalom Y. A multiple model adaptive dual control algorithm for stochastic systems with unknown parameters Automatic Control // IEEE Transactions. 2003. Vol. 25, iss. 4. P. 703–710.

17. Tse E. Bar-Shalom. Y. An actively adaptive control for linear systems with random parameters via the dual control approach Automatic Control // IEEE Transactions. 2003. Vol. 18, iss. 2. P. 109–117.

© Agafonov E. D., Shishkina A. V., 2017

УДК 51-74

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 719–726

ЧИСЛЕННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СОТОВОГО ТИПА

С. А. Гусев[1, 2], В. Н. Николаев[3*]

[1]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. академика Лаврентьева, 6
[2]Новосибирский государственный технический университет
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20
[3]Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина
Российская Федерация, 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21
[*]E-mail: sag@osmf.sscc.ru

Предложен метод для определения теплового состояния теплозащитной панели сотового типа. Применение теплозащитных материалов такого типа является перспективным направлением при конструировании высокоскоростных летательных аппаратов. Рассматриваемый процесс переноса тепла описывается краевой задачей для уравнения теплопроводности. При этом предполагается, что коэффициенты температуропроводности материалов, из которых состоит панель, являются постоянными величинами, а процесс передачи тепла осуществляется только посредством теплопроводности. Предложенный метод основан на вероятностном представлении решения краевой задачи в виде математического ожидания от функционала случайного процесса диффузионного типа и численном моделировании этого случайного процесса. В более ранних работах предлагалось проводить вычисления с использованием метода Эйлера. В связи с тем, что процесс теплообмена происходит в неоднородной среде, при численном моделировании траекторий случайного процесса используется сглаживание разрывных коэффициентов уравнения теплопроводности на основе интегрального усреднения. При этом в подобластях, в которых среда однородная, моделируемый случайный процесс является винеровским. Этот факт означает, что значительного ускорения счёта можно достичь путем использования в этих подобластях метода случайного блуждания по сферам. Предлагается для моделирования винеровского процесса внутри ячеек сотовой панели использовать метод блуждания по сферам, а для расчётов по каркасу панели и в его окрестности – метод Эйлера. Проведённые расчёты по данным физического эксперимента показали значительную эффективность предложенного комбинированного метода по сравнению с вычислениями только одним методом Эйлера.

Ключевые слова: сотовая панель, задача теплообмена, вероятностное представление, численно-статистическое моделирование, винеровский процесс, метод Эйлера, метод блуждания по сферам.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 719–726

NUMERICAL AND STATISTICAL METHOD FOR SOLVING THE HEAT EXCHANGE PROBLEMS IN THE HEAT-PROTECTIVE CONSTRUCTIONS OF THE HONEYCOMB TYPE

S. A. Gusev[1, 2], V. N. Nikolaev[3*]

[1]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
6, Academika Lavrenjeva Av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
[2]Novosibirsk State Technical University
20, K. Marksa Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[3]SibNIA named after S. A. Chaplygin
21, Polzunova Str., Novosibirsk, 630051, Russian Federation
E-mail: sag@osmf.sscc.ru

A method for determining the thermal state of a heat insulation panel of the honeycomb type is proposed in the paper. The use of heat-shielding materials of this type is a promising direction in the design of high-speed aircraft. The considered heat transfer is described by the boundary value problem for the heat equation. It is assumed that the thermal diffusivity coefficients of the materials of the panel are the given constants, and the heat exchange process occurs only due to thermal conductivity. The proposed method is based on the probability representation of the solution of the boundary value problem, which is an expectation of the functional of the random process of the diffusion type, and the numerical simulating this random process. In earlier papers the authors offered to perform the computations by the Euler method. As the heat exchange occurs in inhomogeneous medium, we use smoothing discontinuous coefficients

of the heat equation, based on the integral averaging, in numerical simulation of trajectories of the random process. The simulated random process coincides with Wiener process in subareas in which the medium is homogeneous. This fact means that a significant reduction in computational costs can be achieved by using the method of the random walks on spheres in these subareas. In the paper we propose to use the random walks on spheres in the cells of the honeycomb panel and the Euler method in moving on the frame and its vicinity. The calculations performed according to the data of the physical experiment have shown the high efficiency of the proposed combined method in comparison with calculations performed by only the Euler method.

Keywords: honeycomb panel, heat exchange problem, probability representation, numerical statistical modeling, Wiener process, Euler method, walks on spheres method.

Введение. При конструировании авиационной и космической техники важнейшее значение приобретает устройство тепловой защиты летательных аппаратов. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы является применение теплозащитных панелей сотового типа [1–5]. Сотовая теплозащитная панель представляет собой конструкцию, состоящую из параллельно расположенных пластин, между которыми заключен тонкий каркас в виде пчелиных сот, заполненных некоторым веществом с низкой теплопроводностью. Основными преимуществами таких средств тепловой защиты являются хорошие теплофизические свойства и небольшой вес при относительно невысокой стоимости и достаточной прочности. Данная статья посвящена математическому моделированию процессов теплообмена в таких теплозащитных конструкциях и разработке метода расчёта для определения их теплового состояния в реальных условиях.

В работе [6] для расчёта теплопереноса в сотовой панели предлагался численно-статистический метод, основанный на вероятностном представлении решения краевой задачи для уравнения теплопроводности и численном решении стохастических дифференциальных уравнений (СДУ). При этом делалось сглаживание разрывных коэффициентов уравнения теплопроводности на основе интегрального усреднения, а численное решение СДУ осуществлялось методом Эйлера.

С помощью метода Эйлера возможно получение хороших статистических оценок решения уравнения теплопроводности, но большая трудоёмкость такого подхода даже при хорошей возможности распараллеливания и применении суперкомпьютерной техники не позволяет проводить реальные расчёты для достаточно больших интервалов полётного времени.

С другой стороны, если теплофизические свойства материалов, из которых состоит сотовая панель, незначительно изменяются в рассматриваемом диапазоне температур и внутри панели отсутствуют источники тепловой энергии, то возможна модификация алгоритма расчёта, позволяющая значительно уменьшить вычислительные затраты. Действительно, если коэффициенты температуропроводности материалов сотовой панели постоянны, а передача тепловой энергии внутри панели осуществляется исключительно теплопроводностью, то случайный процесс в однородной среде, который присутствует в вероятностном представлении, есть ни что иное, как винеровский процесс. Точка первого выхода винеровского процесса на границу шара имеет на ней равномерное распределение.

Следовательно, при моделировании траекторий винеровского процесса в подобластях с однородной средой можно двигаться не по траекториям, которые получаются методом Эйлера, а по границам шаров, находящихся в этих подобластях. В этом состоит основная идея метода случайного блуждания по сферам [7]. Но при решении нестационарных задач требуется помимо точки первого выхода винеровского процесса на границу шара ещё моделировать время первого достижения границы шара. Как известно [8], распределение времени первого выхода винеровского процесса на границу шара совпадает с распределением времени первого достижения уровня, равного радиусу шара, одномерным бесселевским процессом. Но плотность времени первого достижения бесселевским процессом заданного уровня выражается сложной формулой в виде ряда, содержащего функции Бесселя первого рода и их положительные нули. По этой формуле очень затруднительно построить эффективный алгоритм для моделирования времени первого выхода. С другой стороны, вместо заданного уровня, который требуется достичь, можно подобрать некоторые кривые [9], зависящие от t, такие, что получаются достаточно простые и удобные для моделирования формулы для плотности времени первого достижения бесселевским процессом этих кривых. Этот метод используется в данной работе, и он называется блужданием по движущимся сферам.

В качестве области изменения пространственных переменных x_1, x_2, x_3 в работе принимается прямоугольный параллелепипед $G=(-l_1,l_1)\times(-l_2,l_2)\times(0,l_3)$. При этом G есть объединение двух непересекающихся подмножеств: $G=G_1\cup G_2$, где G_1 – подобласть, соответствующая каркасу и пластинам, ограничивающим панель, а G_2 есть объединение подобластей, соответствующих ячейкам, содержащим теплоизоляционный материал. Каждая ячейка представляет собой внутренность правильной шестиугольной призмы, боковая поверхность которой параллельна оси x_3. Предполагается, что рассматриваемый процесс теплопередачи происходит на отрезке времени $[0,T]$ и описывается следующей краевой задачей для уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\sum_{i=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(b(x)\frac{\partial u}{\partial x_i}\right),$$

где

$$b(x)=\begin{cases} b_1, & x\in G_1 \\ b_2, & x\in G_2 \end{cases}, \qquad (1)$$

$$u(x,0)=\varphi(x), \qquad (2)$$

$$\left.\frac{\partial u}{\partial x_1}\right|_{x_1=-l_1}=0,\ \left.\frac{\partial u}{\partial x_1}\right|_{x_1=l_1}=0, \qquad (3)$$

$$\left.\frac{\partial u}{\partial x_2}\right|_{x_2=-l_2}=0,\ \left.\frac{\partial u}{\partial x_2}\right|_{x_2=l_2}=0, \qquad (4)$$

$$\lambda\left.\frac{\partial u}{\partial x_3}\right|_{x_3=0}=\alpha_1(t)\big(u-\psi_1(t)\big), \qquad (5)$$

$$-\lambda\left.\frac{\partial u}{\partial x_3}\right|_{x_3=l}=\alpha_2(t)\big(u-\psi_2(t)\big). \qquad (6)$$

В (1)–(6) использованы следующие обозначения: φ – начальное распределение температуры в панели; λ – коэффициент теплопроводности углепластика; b_1, b_2 – коэффициенты температуропроводности углепластика и воздуха соответственно; α_1, α_2 – коэффициенты теплообмена между панелью и внешней средой; ψ_1, ψ_2 – температура внешней среды у нижней и верхней сторон панели соответственно.

Сглаживание коэффициентов. Поскольку теплозащитная панель состоит из двух материалов с различными теплофизическими свойствами, то в задаче (1)–(6) мы имеем уравнение теплопроводности с разрывным коэффициентом температуропроводности. Достаточно полное математическое исследование краевых задач для параболических уравнений с разрывными коэффициентами дано в книге [10]. Там же приведены условия существования и единственности обобщенного решения (теорема 5.1, гл. III) в пространстве функций $V_2^{0,1}(Q_T)$ $\big(Q_T=G\times(0,T)\big)$, обладающих свойством $\int\limits_0^{T-h}\int\limits_G h^{-1}(u(x,t+h)-u(x,t))^2dxdt\to 0$ при $h\to 0$, с нормой

$$|u|_{Q_T}=\max_{0\le t\le T}\|u(x,t)\|_{L_2(G)}+\left(\int\limits_{Q_T}u_x^2dxdt\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (7)$$

Как утверждается в [10] (теорема 4.5, гл. III), обобщенное решение краевой задачи с разрывными коэффициентами в параболическом уравнении в норме пространства $V_2^{0,1}\big(Q_T\big)$ устойчиво относительно вариаций коэффициентов. Из этой теоремы применительно к задаче (1)–(6) следует, что если при $m\to\infty$ равномерно ограниченная последовательность $b^{(m)}$ сходится почти всюду к b, тогда обобщенные решения задач с коэффициентами $b^{(m)}$ сходятся сильно в норме $V_2^{0,1}\big(Q_T\big)$ к обобщенному решению задачи (1)–(6).

Таким образом, при достаточно больших значениях m приближенное решение $u^{(m)}$ задачи (1)–(6) с разрывным коэффициентом температуропроводности можно получить, если решать задачу, в которой в уравнении (1) этот коэффициент заменить на его гладкую аппроксимацию $b^{(m)}$. В качестве такой замены можно, например, рассматривать его сглаживание в окрестности поверхностей разрыва с помощью интегрального усреднения с бесконечно дифференцируемым финитным ядром [11]:

$$b^{(m)}(x)=\int\limits_{|x-y|<\rho_m}\omega_{\rho_m}\big(|x-y|\big)\,b(y)dy=$$

$$=\frac{1}{\rho_m^3}\int\limits_{|x-y|<\rho_m}\omega_1\left(\frac{|x-y|}{\rho_m}\right)b(y)dy. \qquad (8)$$

При этом $\omega_1(|\xi|)=0$ при $|\xi|>1$; $\int\limits_{|\xi|\le 1}\omega_1(|\xi|)=1$.

Предполагается, что $\rho_m\to 0$ при $m\to\infty$. Функции $b^{(m)}$ имеют все производные любого порядка [6]. Поскольку $b\in L_q(G)$ $(q>0)$, то для любой подобласти $G'\subset G$, отстоящей от границы G на расстоянии, не меньшем ρ_m, усреднение $b^{(m)}$ сходится к b в $L_q(G')$, т. е. $\left\|b^{(m)}-b\right\|_{q,G'}\le\sup\limits_{|v|\le\rho_m}\left(\int\limits_{G'}|b(x-v)-b(x)|^q dx\right)^{\frac{1}{q}}\to 0$ при $m\to\infty$. Таким образом, аппроксимации $b^{(m)}$ сходятся к b в норме пространства $L_q(G)$.

Известно также, что сходимость в $L_q(G)$ влечет сходимость по мере, а из сходящейся последовательности функций по мере можно выбрать подпоследовательность, сходящуюся почти всюду [12]. Причем в [12] дан конструктивный метод построения такой подпоследовательности. В связи со сказанным далее будем считать, что такая подпоследовательность выбрана, и это есть последовательность $b^{(m)}$.

В результате замены в (1)–(6) коэффициента температуропроводности функцией $b^{(m)}$ приходим к следующей краевой задаче:

$$\frac{\partial u^{(m)}}{\partial t}=b^{(m)}(x)\sum_{i=1}^{3}\frac{\partial^2 u^{(m)}}{\partial x_i^2}+\sum_{i=1}^{3}\frac{\partial b^{(m)}}{\partial x_i}\frac{\partial u^{(m)}}{\partial x_i}, \qquad (9)$$

$$u^{(m)}(x,0)=\varphi(x), \qquad (10)$$

$$\left.\frac{\partial u^{(m)}}{\partial x_1}\right|_{x_1=-l_1}=0,\ \left.\frac{\partial u^{(m)}}{\partial x_1}\right|_{x_1=l_1}=0, \qquad (11)$$

$$\left.\frac{\partial u^{(m)}}{\partial x_2}\right|_{x_2=-l_2}=0,\ \left.\frac{\partial u^{(m)}}{\partial x_2}\right|_{x_2=l_2}=0, \qquad (12)$$

$$\lambda\left.\frac{\partial u^{(m)}}{\partial x_3}\right|_{x_3=0}=\alpha_1(t)\big(u-\psi_1(t)\big), \qquad (13)$$

$$-\lambda\left.\frac{\partial u^{(m)}}{\partial x_3}\right|_{x_3=l}=\alpha_2(t)\big(u-\psi_2(t)\big). \qquad (14)$$

Далее в работе будут использоваться следующие обозначения: ∂G – граница области G; χ_A – индикаторная функция множества A. Будем предполагать, что заданные в граничных условиях функции α_1, α_2,

ψ_1, ψ_2 такие, что для некоторого $0<\alpha<1$ существует решение задачи (9)–(14) в пространстве Гельдера $H^{3+\alpha,\frac{3+\alpha}{2}}(Q_T)$ [10] (теорема 5.3, гл. IV). Доказано [13], что при выполнении условий существования и единственности решений задач (1)–(6) и (9)–(14) для любого $\varepsilon>0$ существует натуральное число m_ε такое, что при $m>m_\varepsilon$ выполняется неравенство $\operatorname{vrai\,sup}_{Q_T}|u^{(m)}-u|<\varepsilon$. Следовательно, выбирая радиус усреднения достаточно малым, можно с любой заданной точностью приблизить решение $u^{(m)}$ к u.

Вероятностное представление решения. Для решений краевых задач для параболических уравнений известны вероятностные представления [14; 15]. Чтобы получить вероятностное представление решения задачи (9)–(14), введём систему СДУ:

$$X_r = x + \int_{T-t}^{r} \sigma_v \chi_G(X_v) dW_v^{(3)} + \int_{T-t}^{r} a_v \chi_G(X_v) dv + \int_{T-t}^{r} n(X_v)\chi_{\partial G}(X_v) dK_v, \quad (15)$$

$$Y_r = 1 + \int_{T-t}^{r} \alpha_1(v) Y_v \chi_{X_3(v)=0} dK_v + \int_{T-t}^{r} \alpha_2(v) Y_v \chi_{X_3(v)=l_3} dK_v, \quad (16)$$

$$Z_r = \int_{T-t}^{r} \alpha_1(v)\psi_1(v) Y_v \chi_{X_3(v)=0} dK_v + \int_{T-t}^{r} \alpha_2(v)\psi_2(v) Y_v \chi_{X_3(v)=l_3} dK_v, \quad (17)$$

$$K_r = \int_{T-t}^{r} \chi_{\partial G}(X_v) dK_v, \quad (18)$$

где $x\in G$ – начальная точка для X_v; $W_v^{(3)}$ – трехмерный винеровский процесс; $\sigma_v = \left(2b^{(m)}(X_v)\right)^{\frac{1}{2}}$; a_v – вектор с координатами $\left(\frac{\partial b^{(m)}}{\partial x_i}\right)$, i = 1, 2, 3; $n(P)$ – внутренняя нормаль в точке $P\in\partial G$; K_v – локальное время пребывания процесса X_v на границе, т. е. скалярный возрастающий процесс, который растет, только когда $K_v\in\partial G$.

Вероятностным представлением решения задачи (9)–(14) является математическое ожидание

$$u(x,t) = E_{x,T-t}\left(\varphi(X_T)Y_T + Z_T\right), \quad (19)$$

где символом $E_{x,T-t}$ обозначено математическое ожидание относительно вероятностной меры $P_{x,T-t}$, соответствующей случайному процессу, стартующему в момент времени $T–t$ из точки x, т. е. $X_{T-t}=x$.

Приближенные значения $u^{(m)}(x,t)$ можно получить методом Монте-Карло путем статистического моделирования траекторий системы СДУ (15)–(18). Для этой цели в работах [6; 13] предлагалось использовать метод Эйлера. Моделирование траекторий методом Эйлера для СДУ (15)–(18) осуществляется по следующей схеме:

$$X_{i+1}^{\Delta} = x_i + h^{\frac{1}{2}}\sigma_i\xi_i + ha_i, \quad (20)$$

$$x_{i+1} = X_{i+1}^{\Delta} + \left(\Delta_{i+1}K\right) n_i \chi_{R^3\setminus\bar{G}}\left(X_{i+1}^{\Delta}\right), \quad (21)$$

$$y_{i+1} = y_i\left(1 + (\alpha_1)_i\chi_{\partial G}(x_i)\Delta_{i+1}K + (\alpha_2)_i\chi_{\partial G}(x_i)\Delta_{i+1}K\right), \quad (22)$$

$$z_{i+1} = z_i + y_i(\alpha_1)_i(\psi_1)_i\chi_{\partial G}(x_i)\Delta_{i+1}K + y_i(\alpha_2)_i(\psi_2)_i\chi_{\partial G}(x_i)\Delta_{i+1}K, \quad (23)$$

$$k_{i+1} = k_i + \Delta_{i+1}K, \quad (24)$$

где i, $i+1$ – номера узлов сетки; ξ_i – вектор трех независимых $N(0,1)$ случайных величин; $\Delta_{i+1}K = d\left(X_{i+1}^{\Delta}\right)$ – расстояние от X_{i+1}^{Δ} до ∂G в случае выхода X_{i+1}^{Δ} из области.

Применение методов Эйлера и случайного блуждания по движущимся сферам. Поскольку в работе предполагается, что теплофизические свойства материалов, из которых состоит сотовая панель, являются постоянными величинами, то случайный процесс X_v в однородной среде, соответствующей каркасу или ячейке, с точностью до постоянного множителя совпадает с винеровским процессом.

Известно, что точка первого выхода из шара винеровского процесса, начинающего движение из центра этого шара, имеет на границе этого шара равномерное распределение. При этом эта точка не зависит от времени первого выхода на границу. В связи со сказанным предлагается для ускорения моделирования траекторий СДУ (15)–(18) при их прохождении внутри ячейки использовать метод случайного блуждания по сферам, а движение по каркасу и некоторой его окрестности моделировать с помощью метода Эйлера с малым шагом.

При решении нестационарных задач методом блуждания по сферам требуется каждый раз моделировать не только точку первого выхода из шара, но и время первого выхода. Для моделирования времени первого выхода из шара радиуса R в работе используется определение времени первого достижения уровня R бесселевским процессом, который является решением СДУ [8]:

$$S_t = S_0 + \int_0^t S_r^{-1} dr + W_t. \quad (25)$$

Одномерный случайный процесс (19) получается в результате применения формулы Ито к евклидовой норме трехмерного винеровского процесса с начальной точкой $x\in G$. При этом выполняется равенство $S_0 = \|x\|$.

Время первого выхода трехмерного винеровского процесса из шара радиуса R и время первого достижения случайным процессом уровня R имеют одинаковое распределение. Известны явные формулы для плотности времени первого достижения бесселевским процессом заданного уровня для начальных точек $S_0 = 0$ и $S_0 > 0$ [9]. Но эти формулы представлены в виде рядов, содержащих функции Бесселя первого рода и их положительные нули, и поэтому численно-статистическое моделирование по ним крайне затруднительно. С другой стороны, вместо заданного уровня, который требуется достичь, можно подобрать некоторые кривые, зависящие от t, такие, что получаются достаточно простые и удобные для моделирования формулы для плотности времени первого достижения бесселевским процессом этих кривых. Каждая такая кривая определяется задаваемой положительной сигма-конечной мерой μ. Определим функцию

$$r(t,x) \equiv q(t,0,x) - \frac{1}{a}\int_0^\infty q(t,y,x)\mu(dy), \qquad (26)$$

где $q(t, y, x)$ – плотность вероятности перехода бесселевского процесса; a – числовой параметр.

Из свойства плотности q следует, что функции q и r удовлетворяют параболическому уравнению

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{x}v\right). \qquad (27)$$

Пусть функция $g(t)$ такая, что на кривой $x = g(t)$ выполняется равенство $r(t,x) = 0$. Тогда эту кривую можно рассматривать в качестве граничного условия к уравнению (27). Причем с учетом того, что бесселевский процесс стартует из заданной точки, решение полученной краевой задачи определяется единственным образом.

Обозначим τ_g время достижения бесселевским процессом этой подвижной границы, т. е. $\tau_g = \inf\{t > 0,\ S_t = g(t)\}$. Можно показать [9], что плотность времени достижения границы $x - g(t) = 0$ удовлетворяет уравнению

$$p_g(t) = -\frac{d}{dt}\left(\int_0^{g(t)} r(t,x)dx\right). \qquad (28)$$

Если положить $\mu(dy) = y^2 dy$, то $g(t)$ и $p_g(t)$ определяются по формулам [9]

$$g(t) = \left(2t\ln\left(\frac{a}{\Gamma\left(\left(3/2\right)\sqrt{2}\right)}\right)\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$p_g(t) = \frac{g^3(t)}{2at}. \qquad (29)$$

В этом случае получается простая формула для моделирования τ_g

$$\tau_g = \left(\frac{a}{\Gamma\left(\left(3/2\right)\sqrt{2}\right)}\right)^{\frac{2}{3}} e^{-H}, \qquad (30)$$

где H – гамма-распределенная случайная величина с параметрами $\frac{5}{2}$, $\frac{2}{3}$. В ходе вычислений, после того, как получено значение τ_g, радиус сферы для определения очередной точки положения случайного процесса определяется по первой формуле в (29). Выбор параметра a дает возможность определить радиусы моделируемых шаров так, чтобы они не выходили за границы текущей ячейки и чтобы они не были слишком малы. В случае, если расстояние до границы ячейки менее некоторой заданной величины ε, вычисления производятся согласно методу Эйлера.

Результаты расчётов. Вычисления проводились для сотовой панели, каркас которой и ограничивающие пластины изготовлены из углепластика, а наполнителем служит воздух. Основные характеристики панели следующие: общая толщина панели – 0,035 м; толщина каждой из ограничивающих пластин панели – 0,001 м; толщина стенок сотового каркаса – $6\cdot10^{-5}$ м; сотовыми ячейками являются правильные шестиугольники одинакового размера с длиной стороны, равной 0,0042 м; коэффициенты температуропроводности углепластика и воздуха равны соответственно $8{,}0\cdot10^{-4}$ и $2{,}36\cdot10^{-5}$ м^2/с.

Граничные условия для расчётов были сформированы на основании физических характеристик, полученных по данным лётного эксперимента в холодном климате и соответствуют первым 150 с взлёта самолета. На рис. 1 приведён график коэффициента теплообмена на внешней стороне обшивки.

На рис. 2 приведены полученные в результате расчётов при объёме выборки 2000 траекторий случайного процесса графики изменения значений температуры в середине панели и у края панели, обращённого внутрь салона.

В табл. 1, 2 приведены для сравнения затраты времени счёта предложенным комбинированным методом и только методом Эйлера с различными шагами по каркасу h_f и по объёму внутри ячеек h_a.

Результаты расчётов позволяют сделать следующие выводы:

а) предложенный метод значительно эффективнее использовавшегося ранее метода Эйлера;

б) так как при увеличении шага в методе Эйлера эффективность комбинированного метода растет по сравнению с методом Эйлера, то основная часть вычислительных затрат приходится на движение по тонкому каркасу;

в) затраты в средней точке панели меньше, чем у края, поскольку в середине панели большая часть траектории приходится на движение по внутреннему пространству ячеек, где вычисления проводились с меньшим шагом.

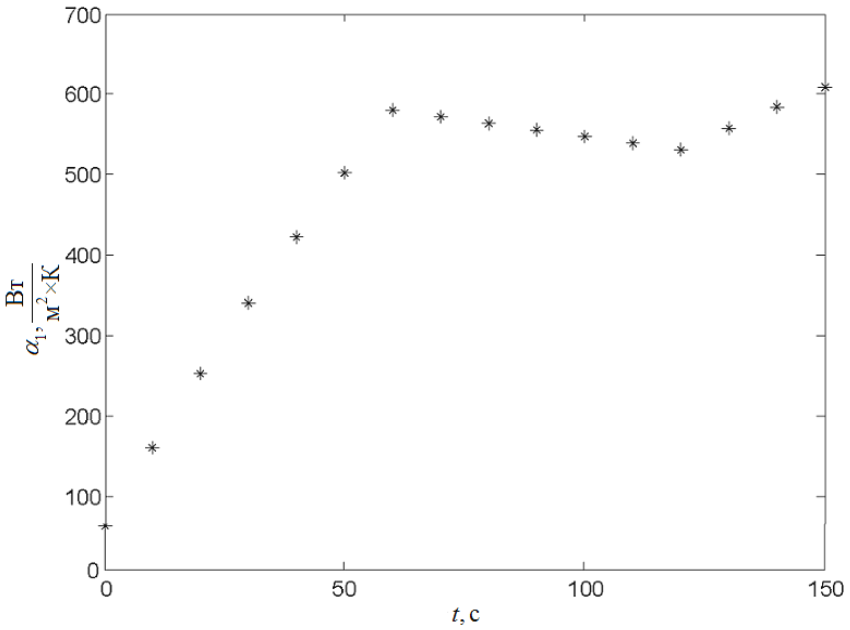


Рис. 1. Коэффициент теплообмена на внешней стороне обшивки

Fig. 1. Heat transfer coefficient on the outside of the skin

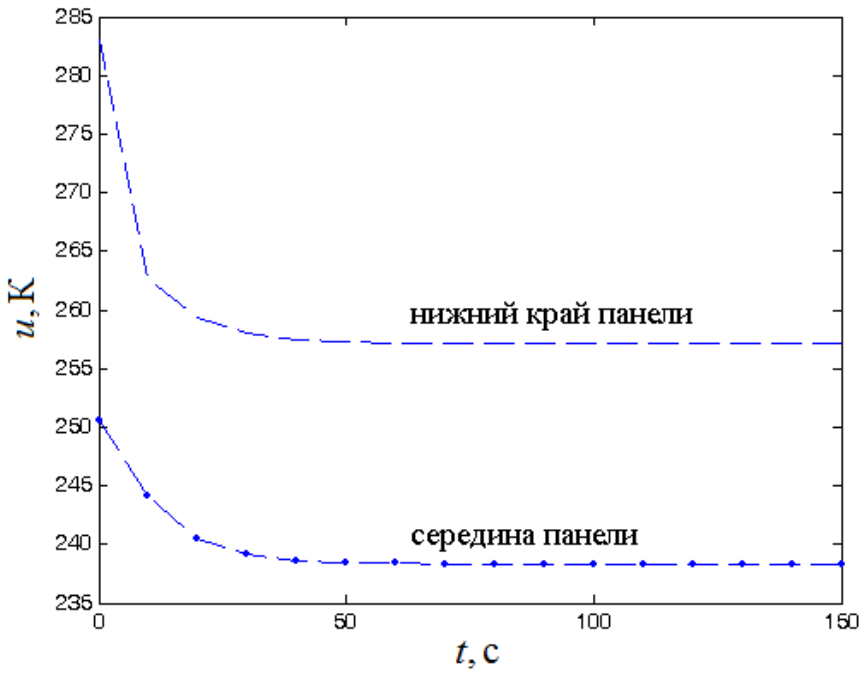


Рис. 2. Значения температуры внутри панели

Fig. 2. Temperature values inside the panel

Таблица 1

Затраты времени счёта в средней точке панели, с

Метод	$h_a = 2{,}5 \cdot 10^{-7}, h_f = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$	$h_a = 5{,}0 \cdot 10^{-7}, h_f = 5{,}0 \cdot 10^{-8}$	$h_a = 10^{-6}, h_f = 10^{-7}$
Комбинированный метод	1064	548	154
Метод Эйлера	5839	3070	1563

Таблица 2

Затраты времени счёта вблизи границы $x_3 = 0$, с

Метод	$h_a = 2{,}5 \cdot 10^{-7}, h_f = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$	$h_a = 5{,}0 \cdot 10^{-7}, h_f = 5{,}0 \cdot 10^{-8}$	$h_a = 10^{-6}, h_f = 10^{-7}$
Комбинированный метод	1394	479	188
Метод Эйлера	6193	4156	1854

Заключение. В работе предложен численно-статистический метод для оценки теплового состояния теплозащитных конструкций сотового типа. Данный метод основан на вероятностном представлении краевой задачи для параболического уравнения и комбинированном применении методов Эйлера и случайного блуждания по движущимся сферам. Получено значительное ускорение счёта по сравнению с моделированием траекторий только одним методом Эйлера.

Благодарности. Работа С. А. Гусева выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-01-00698 А.

Acknowledgments. S. A. Gusev's work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 17-01-00698 A.

Библиографические ссылки

1. Результаты экспериментальной отработки спускаемой капсулы космического аппарата «Фобос-Грунт» для доставки образцов грунта Фобоса на Землю / С. Н. Алексашкин [и др.] // Вестник ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина». 2011. № 5. С. 3–10.

2. Николаев В. Н., Гусев С. А. Экспериментально-теоретические исследования негерметизированного отсека летательного аппарата с сотовыми конструкциями обшивки // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 9. С. 10–19.

3. Николаев В. Н., Гусев С. А. Математическое моделирование теплового состояния отсеков и систем самолета с сотовыми конструкциями обшивки // Полёт: Общероссийский научно-технический журнал. 2017. № 5. С. 3–11.

4. Nikolayev V., Gusev S. Heat condition compartments of aircraft with a honeycomb structure. Saarbrucken : LAMBERT Publ., 2017. 133 p.

5. Николаев В. Н., Гусев С. А. Исследование теплового состояния отсеков пассажирского самолёта с сотовыми конструкциями фюзеляжа // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 1 (62). С. 146–167.

6. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Calculation of heat transfer in heterogeneous structures such as honeycomb by using numerical solution of stochastic differential equations // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1016. P. 758–763.

7. Muller M. E. Some continuous Monte Carlo methods for the Dirichlet problem // The Annals of Mathematical Statistics. 1956. Vol. 27, No. 3. P. 569–589.

8. Revuz D., Yor M. Continuous Martingales and Brownian Motion. 3 ed. Springer Publ., 1999. 602 c.

9. Deaconu M., Herrmann S. Hitting time for the Bessel processes – walk on moving spheres algorithm (WOMS) // The Annals of Applied Probability. 2013. Vol. 23, No. 6. P. 2259–2289.

10. Ладыженская О. А., Солонников В. А., Уральцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М. : Наука, 1967. 736 с.

11. Соболев С. Л. Некоторые применения функционального анализа в математической физике. 3-е изд. М. : Наука, 1988. 336 р.

12. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М. : Наука, 1976. 336 с.

13. Гусев С. А. Применение СДУ к оценке решения уравнения теплопроводности с разрывными коэффициентами // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. 2015. Т. 18, № 2. С. 147–161.

14. Гихман И. И., Скороход А. В. Стохастические дифференциальные уравнения и их приложения. Киев : Наукова думка, 1982. 612 с.

15. Кушнер Г. Дж. Вероятностные методы аппроксимации в стохастических задачах управления и теории эллиптических уравнений. М. : Наука, 1985. 222 с.

References

1. Alexashkin S. N., Martynov M. B., Pichkhadze K. M., Finchenko V. S. [Results of integrated development testing of "Phobos-Grunt" SC's descent capsule, intended for Phobos soil samples delivery to the Earth]. *Vestnik FGUP NPO im. S. A. Lavochkina.* 2011, No. 5, P. 3–10 (In Russ.).

2. Nikolaev V. N., Gusev S. A. [Experimental-theoretical studies of the unsealed aircraft compartment with honeycomb structures]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2017, No. 9, P. 10–19 (In Russ.).

3. Nikolaev V. N., Gusev S. A. [Mathematical modeling of the thermal state of compartments and aircraft systems with honeycomb structures]. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal.* 2017, No. 5, P. 3–11 (In Russ.).

4. Nikolayev V., Gusev S. Heat condition compartments of aircraft with a honeycomb structure. Saarbrucken, LAMBERT Publ., 2017. 133 p.

5. Nikolaev V. N., Gusev S. A. [Simulation of heat condition compartments of passenger aircraft with a honeycomb structure of the fuselage. Scientific]. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2016, No. 1 (62), P. 146–167 (In Russ.).

6. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Calculation of heat transfer in heterogeneous structures such as honeycomb by using numerical solution of stochastic differential equations. *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 1016, P. 758–763.

7. Muller M. E. Some continuous Monte Carlo methods for the Dirichlet problem. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1956, Vol. 27, No. 3, P. 569–589.

8. Revuz D., Yor M. Continuous Martingales and Brownian Motion. 3ed., Springer Publ., 1999. 602 p.

9. Deaconu M., Herrmann S. Hitting time for the Bessel processes – walk on moving spheres algorithm (WOMS). *The Annals of Applied Probability*, 2013, Vol. 23, No. 6, P. 2259–2289.

10. Ladyzhenskaya O. A., Solonnikov V. A., Uraltseva N. N. *Lineynye i kvazilineynye uravneniya parabolicheskogo tipa* [Linear and quasilinear equations of parabolic type]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 736 p.

11. Sobolev S. L. *Nekotorye primeneniya funktsional'nogo analiza v matematicheskoy fizike* [Applications of Functional Analysis in Mathematical Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1988.

12. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 336 p.

13. Gusev S. A. *Numerical Analysis and Applications.* Springer Publ., 2015, No. 8(2), P. 22–34.

14. Gikhman I. I., Skorohod A. V. *Stokhasticheskie differentsial'nye uravneniya i ikh prilozheniya* [Sochastic differential equations and their applications]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 612 p.

15. Kushner H. J. *Probability Methods for Approximations in Stochastic Control and for Elliptic Equations*. Academic Press, 1977, 222 p.

© Гусев С. А., Николаев В. Н., 2017

UDC 519.65

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 727–735

ABOUT PARAMETRIC IDENTIFICATION ALGORITHMS OF DISCRETE-CONTINUOUS PROCESSES

M. A. Denisov, E. A. Chzhan

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: max_denisov00@mail.ru

Researches presented in the paper are devoted to parametric modelling of multidimensional processes of discrete-continuous type in the condition of priori information lack. Similar processes occur in the space industry, for example, in the manufacture of products based on electronic components. The article considers multidimensional processes with unknown mathematical description. Using parametric approach, we choose the structure of investigated process with the accuracy to within parameters, and the next step is to estimate the model parameters from the available sample of observations of the process input and output variables. The paper examines the case when due to the lack of priori knowledge about the object an error is allowed at the stage of parametric structure choosing. The relative approximation error is used to estimate the model accuracy, which shows the difference between model and object outputs. A comparative analysis of several parametric models for one investigated object is carried out is. Using the method of least squares we obtain estimates of the parameters. The paper presents the results of a series of computational experiments illustrating the dependence of the modelling error on the object noise level, as well as on the sample size of observations of the input and output variables.

One of the obvious parametric models advantages is the ease of its applying. However, if the dimension of the input variables vector is high, the process has a complex structure, and there is no priori information about the object structure, then it is difficult to use parametric methods. In this case, it is advisable to use nonparametric identification methods. In this paper we use a nonparametric estimation of the regression function on observations of Nadaraya-Watson as an estimate of the process output variable. However, such estimates require a large number of initial data, also they are sensitive to various kinds of defects in the initial samples of observations. Besides that, the paper compares nonparametric model with parametric one for the investigated process.

Keywords: parametric identification, priori information, discrete-continuous processes.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 727–735

О ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

М. А. Денисов, Е. А. Чжан

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: max_denisov00@mail.ru

Представленные исследования посвящены параметрическому моделированию многомерных процессов дискретно-непрерывного типа в условиях недостатка априорной информации. Подобного рода процессы встречаются в космической отрасли, например, при производстве изделий электронной компонентной базы. Рассматривается многомерный процесс, математическое описание которого остается неизвестным. При параметрическом подходе структура исследуемого процесса выбирается с точностью до параметров, а на следующем этапе происходит оценка параметров модели по имеющейся выборке наблюдений входных и выходных переменных процесса. Рассматривается случай, когда вследствие недостатка априорных знаний об объекте на этапе выбора параметрической структуры допускается ошибка. Точность модели оценивается с помощью относительной ошибки аппроксимации, которая показывает, насколько соответствует значение выхода модели выходу объекта. Проводится сравнительный анализ нескольких параметрических моделей для одного исследуемого объекта. Оценки параметров были получены с помощью метода наименьших квадратов. Приведены результаты серии вычислительных экспериментов, иллюстрирующие зависимость ошибки моделирования от уровня шума объекта, а также от объема выборки наблюдений входных и выходных переменных процесса.

Одним из очевидных преимуществ параметрических моделей является простота их использования. Однако если размерность вектора входных переменных высока, процесс имеет сложную структуру и нет априорной информации о структуре объекта, то использовать параметрические методы затруднительно. В этом

случае целесообразно применять непараметрические методы идентификации. В качестве оценки выходной переменной процесса была использована непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям Надарая–Ватсона. Однако такого рода оценки требуют большого количества исходных данных, являются чувствительными к различного рода недостаткам в исходных выборках наблюдений. Проведен сравнительный анализ работы непараметрической и параметрической модели для одного исследуемого процесса.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, априорная информация, дискретно-непрерывные процессы.

Introduction. When researching different processes or phenomena, it is necessary to build models, since we are not always able to conduct experiments with real objects. Herewith various methods of mathematical modelling and identification theory are used. These methods are relevant for studying processes in different branches of human activities (technological, socio-economic processes, etc.). For instance, designing of space vehicles or liquid rocket engines [1; 2].

It is really important to qualitatively determine the mathematical model of the process at the initial stages of the system investigation. These days higher standards of system control are being set. In order to correspond to them, it is necessary to conduct a lot of research and experiments to ensure the construction of an adequate mathematical model of the considering system and to find a more accurate model structure of the object.

Each stage of identification requires different methods due to increasing of the amount of incoming information obtained from the research results. Depending on the amount of information available about the investigated object, the most appropriate method is chosen. Methods for mathematical models determining from the results of experimental researches are the subject of identification theory [3].

Based on the foregoing, it should be added that the construction of a mathematical model depends on the amount of priori information. In this regard, there are two approaches to identification: in a “narrow” and a “broad” sense. For problems in a “narrow” sense there is a vast amount of priori information, whether it is the structure of the system or the class of models to which it refers. This problem statement is close to real conditions and is more applicable in engineering practice [3].

In the “broad” sense of the identification problem there is clear deficit of priori information, or we have access to information only about a qualitative nature object. These methods are time-consuming as they require detailed consideration in each individual case because of the individual features of the objects under study [3].

In conditions of parametric uncertainty parametric identification methods are basically used. Such methods at the first stage assume the determination of the model structure from the available priori information about the object accurate to a parameter vector, which are later estimated with known methods [4]. With parametric modelling, there are cases when priori information is not enough to accurately determine the structure of the model, which can lead to significant errors. In the worst case this can lead to large inaccuracies at the stage of formulating the identification task, which results in an absolutely wrong solution. This problem led to the development of non-parametric identification methods, which have proliferated in recent years [5]. Surely, non-parametric methods allow analysis without using the object model equation. They are more universal and work with greater uncertainty in priori information, this can not be said about parametric methods [6]. However, under conditions of sufficient information parametric methods give better results.

A large number of scientists, both in Russia and abroad, starting from the middle of the twentieth century conducted their studies related to the problem of system identification, since at those particular years it was really significant to broaden knowledge in the field of control [7]. It is commonly believed that Professor Eykhoff P. (Holland) was the first person who systematized the knowledge of the whole variety of identification algorithms and methods. In his monograph [7] he describes the basic concepts of the model, identification problem setting and gives key methods for solving problems for various classes of objects. His book may be useful for those who are working on construction or analysis of processes or phenomena models nowadays. A bit earlier two Professors Andrew P. Sage and James L. Melsa from the USA wrote their book [8], which considers the most well-known methods of identification back then and also conducts their in-depth analysis. Not less important person among foreign scientists who contributed to the development of identification theory is Professor D. Grop (USA). His book [3] complements the knowledge and information which is presented in the book of two Professors Andrew P. Sage and James L. Melsa bringing his new results in the field of identification, and also considering a wider class of different methods that allow us to determine the parameters and structure of the mathematical model.

In Russia the knowledge in the identification sphere was systemized a bit later than abroad, closer to the end of twentieth century. One of the first scientists who wrote a book about constructing mathematical models of complex control objects was Professor N. S. Raibman. In his pamphlet [9], as the author himself called it, N. S. Raibman describes some of the basic concepts and methods of identification which are intended basically for non-specialists in the control sphere. Thus, the professor tries to popularize the understanding of the methodology for constructing mathematical models. We would also like to mention proceedings of Professor Sh. E. Shteynberg, who tried to summarize the overwhelming majority of identification methods, possible to be used in engineering practice. His book [10] is aimed at considering the methods which are implemented in industrial enterprises, where there are some missed measurements, noise in the object, the correlation of this noise in time with each other. Therefore, it is applicable to specialists developing

control systems. However, the professor's proceedings can be also useful for an ordinary student. Among other things we should say about the Russian scientist, who made a great contribution to the development of identification and whose work would be wrong not to mention. It is Professor Ya. Z. Tsypkin. His book [4] can be called fundamental as it describes a large range of nuances that appear during the identification algorithms formation. Also, the question of the most optimal identification algorithms selection is considered from various sides. In addition, the "Information Theory of Identification" is a more modern book that was published at the very end of the twentieth century, which emphasizes its relevance to the present days.

Nowadays, there is an active development of the theory of identification in all directions. Thus, in his work [11] L. P. Myshlyaev and coauthors suggest presenting the identification system as a closed-loop dynamic system where the controlled object is the structure of the object model. This approach will help to avoid using adaptive control methods which are effective only for certain classes of objects. A wide application of parametric identification is found in electromechanical systems. For example, in the paper [12], a parametric identification algorithm of an induction motor with a cage rotor is given, where in some cases it is difficult to obtain information about the values of parameters on the basis of catalogued data or to determine them experimentally with the use of special devices. Therefore, the question of constructing a parametric model is quite relevant in this case.

For particularly complex technical and human-technical systems, intelligent control systems are used that combine a large number of different identification methods what is very important in today's rapidly developing conditions and a huge flow of information. V. B. Trofimov and S. M. Kulakov write about such systems in their work [13]. The authors present the theoretical and applied fundamental basis of intelligent control systems and also offer to familiarize themselves with algorithms that allow solving the actual tasks of various complex systems monitoring and control. Similar studies have already been conducted earlier in the field of parametric identification. The results are presented in [14].

The Problem Statement. The main goal of the paper is to obtain a parametric estimate of the investigated discrete-continuous process. The case when an error was made at the stage of choosing the model structure was studied. In addition, a nonparametric estimation of the investigated process was constructed. The obtained results are compared with the parametric identification method. The generally accepted flowchart of the investigated discrete-continuous process is shown in fig. 1, where the following notation is used: A is an unknown object functional; $y(t)\in\Omega(y)\subset R^1$ is an output process variable; $u(t) = (u_i(t), i = 1, \ldots, m)\in\Omega(u)\subset R^m$ is a vector input stimulus; $\zeta(t)$ is a vector random stimulus; t is a continuous time; H^u, H^y are communication channels; $h^u(t)$, $h^y(t)$ are random measurements noise; $\{u_i, y_i, i = 1, \ldots, s\}$ is a training sample, where s is a sample size.

Computational experiment. Suppose that the examined object in the computational experiment framework is described by the following equation:

$$y(t) = \alpha_1 \cdot u_1(t) + \alpha_2 \cdot [u_2(t)]^2 + \\ + \alpha_3 \cdot \sin[u_3(t)] + \alpha_4 \cdot u_4(t) + \xi(t), \quad (1)$$

where $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = \alpha$ – are the coefficients of the studied object; $\zeta(t)$ – is noise with mean value equals zero which was generated in the following way:

$$\xi(t) = y(t) \cdot c(t) \cdot k, \quad (2)$$

where $c(t)$ – is a normal distributed random variable in the interval of $[-1;1]$; k – is the noise level.

Let us assume the model equation has the following form:

$$\hat{y}_1(t) = \hat{\alpha}_1 \cdot u_1(t) + \hat{\alpha}_2 \cdot [u_2(t)]^2 + \\ + \hat{\alpha}_3 \cdot \sin[u_3(t)] + \hat{\alpha}_4 \cdot u_4(t). \quad (3)$$

Next, we suppose such situation when in the modelling process an error was made in the structure with u_2 and then the following equation now describes the model:

$$\hat{y}_2(t) = \hat{\alpha}_1 \cdot u_1(t) + \hat{\alpha}_2 \cdot [u_2(t)]^3 + \\ + \hat{\alpha}_3 \cdot \sin[u_3(t)] + \hat{\alpha}_4 \cdot u_4(t). \quad (4)$$

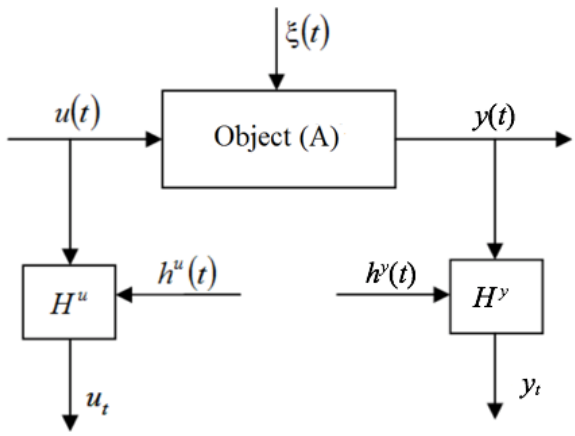


Fig. 1. Flowchart of investigated process

Рис. 1. Схема исследуемого процесса

The next step is to estimate the parameters $\hat{\alpha}_1$, $\hat{\alpha}_2$, $\hat{\alpha}_3$ and $\hat{\alpha}_4$ based on the available sample $\{y_i, u_{1i}, u_{2i}, u_{3i}, u_{4i}, i = 1, \ldots, s\}$. There is a large number of methods for obtaining parameter estimates, for example, the least-squares criterion (hereinafter LS criterion). We will use this criterion. The least-squares criterion is presented below:

$$F(\hat{\alpha}) = \frac{1}{s} \cdot \sum_{i=1}^{s} (y_i - \hat{y}_i)^2 \longrightarrow \min_{\hat{\alpha}}, \qquad (5)$$

where $\hat{y}_i$ – are model output values; $\hat{\alpha} = (\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{\alpha}_4)$ – are unknown coefficients.

Let us assume the relative approximation error, according to which the deviation of the output values of the models from the output values of the object will be calculated, in the following form:

$$W = \sqrt{\frac{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{s-1}\sum_{i=1}^{s}(\hat{m}_y - y_i)^2}}, \qquad (6)$$

where $\hat{m}_y$ – is the expectation estimation of the object output.

The form of the nonparametric model constructed for the examined process is presented below [15]:

$$\hat{y}(u) = \frac{\sum_{i=1}^{s} y_i \prod_{j=1}^{4} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{4} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{c_s}\right)}, \qquad (7)$$

where c_s – a blur parameter and $\Phi(\bullet)$ – a kernel function satisfy convergence conditions [15].

Kernel $\Phi(\bullet)$ has the parabolic form:

$$\Phi(z) = \begin{cases} (0.75 \cdot (1 - |z|)^2, & |z| \le 1, \\ 0, & |z| > 1, \end{cases} \qquad (8)$$

where $z = \frac{u - u_i}{c_s}$.

The computational experiment demonstrates the influence of the error, which was made at the stage of selecting the model parametric structure on the final □odeling results. As the first experiment, we generate the output of the object (1), in which the input variables $u_j, j = 1, \ldots, 4$, are set by uniform-distributed law pseudorandom numbers in the interval of [0,3]. The coefficients of the investigated object will be taken as: $\alpha_1 = 7$, $\alpha_2 = 3$, $\alpha_3 = 10$, $\alpha_4 = 11$. Using LS criterion (5) for (3) and (4) we get the values of the object estimated coefficients. Substituting these values in (3) and (4) we obtain the values of the model outputs.

In fig. 2 the results are represented, where each time-step corresponds to the values of the object and model outputs obtained from the condition that the sample size is $s = 100$, and the noise level is 5 %.

The relative approximation error for the model (3) calculated using (6) equals: $W_1 = 0.09$, but for model (4) equals: $W_2 = 0.14$.

Despite the fact that there is an error in the model structure (4), the results which are shown in fig. 2, as well as the value of the error W_2, indicate that the model describes this object well. This can be explained by presenting the values of the coefficient estimates. For the model (3): $\hat{\alpha}_1 = 6.95$, $\hat{\alpha}_2 = 3.038$, $\hat{\alpha}_3 = 9.986$, $\hat{\alpha}_4 = 11.013$, for the model (4): $\hat{\alpha}_1 = 7.37$, $\hat{\alpha}_2 = 1.06$, $\hat{\alpha}_3 = 11.37$, $\hat{\alpha}_4 = 11.19$. As it is evident, the coefficients values at the parameter u_2 differ the most. We construct a graph that visualizes the dependence of the outputs (1), (3) and (4) on the input variable u_2. For the examined equations we assume $u_1(t) = u_3(t) = u_4(t) = 1.5$; u_2 will generate using uniform distribution by pseudorandom numbers in the interval of [0;3]. In fig. 3 the results of this experiment are shown.

All above conclusions indicate a feature of the LS criterion which is as follows: even if the model structure is chosen incorrectly at first, the criterion will try to correct it by decreasing or increasing one or another coefficient to make the final model output correspond to the object output in the best way.

The error value (6) can change due to a different sample size. In fig. 4 we consider the dependence of these parameters on each other for models of the form (3) and (4) at a 5 % noise level.

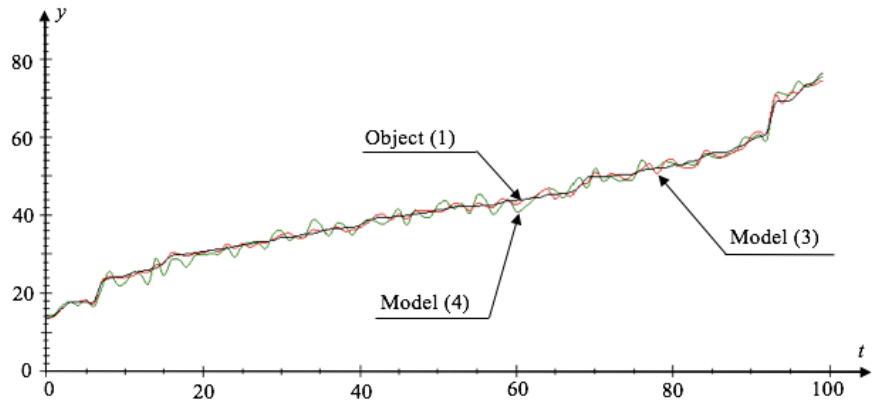


Fig. 2. Graphical dependence of the object (1) and the models (3), (4) outputs in each time-step

Рис. 2. График зависимости выходов объекта (1) и моделей (3), (4) в каждый такт времени

The above given results (fig. 4) show that with the sample size increase, the modelling error tends to one average value.

Among other things, the error (6) changes when the noise level is changed. We investigate this dependence for a sample size $s = 100$ and summarize the results in tab. 1.

According to the results given in tab. 1, we can assume that for the model (3) and model (4) the error increases with the noise level increase, but for the second case it is more.

As the second experiment, we generate an object with input variables u_j, $j = 1, \ldots, 4$ which are set using uniform distribution by pseudorandom numbers in the interval of [–3;3]. Similar to the first experiment, we graph the object output (1) dependence on the models outputs (3) and (4) at a 5 % noise level and the sample size $s = 100$, which is shown in fig. 5.

Relative approximation error (6), for the model (3) equals: $W_1 = 0.03$ and for the model (4) equals: $W_2 = 0.42$.

The values of the coefficient estimates for the second experiment are as follows. Model (3): $\hat{\alpha}_1 = 7.012$, $\hat{\alpha}_2 = 2.99$, $\hat{\alpha}_3 = 10.029$, $\hat{\alpha}_4 = 10.984$; model (4): $\hat{\alpha}_1 = 6.45$, $\hat{\alpha}_2 = 0.12$, $\hat{\alpha}_3 = 9.84$, $\hat{\alpha}_4 = 9.82$.

In this case, the interval of input variables generation had a more significant effect on the final output results of the model (4), which is evident in the error value W_2 and fig. 5.

Similar to the above experiment in fig. 6, the graph that shows the dependence of the outputs (1), (3) and (4) on the input of the variable u_2 is given. For the examined equations we assume $u_1(t) = u_3(t) = u_4(t) = 1.5$, however, now u_2 will be generated by pseudorandom numbers in the interval of [–3;3].

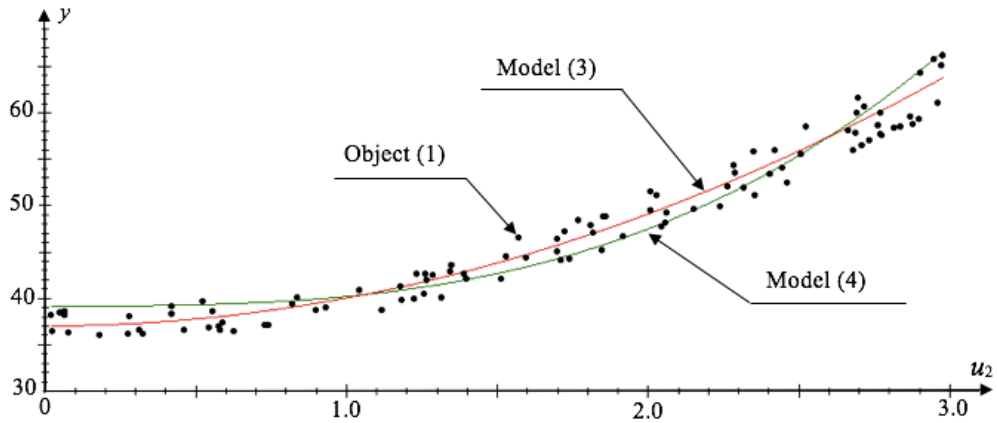


Fig. 3. Dependence of the models (3), (4) and object (1) on u_2 outputs

Рис. 3. Зависимость значений выходов моделей (3), (4) и объекта (1) от u_2

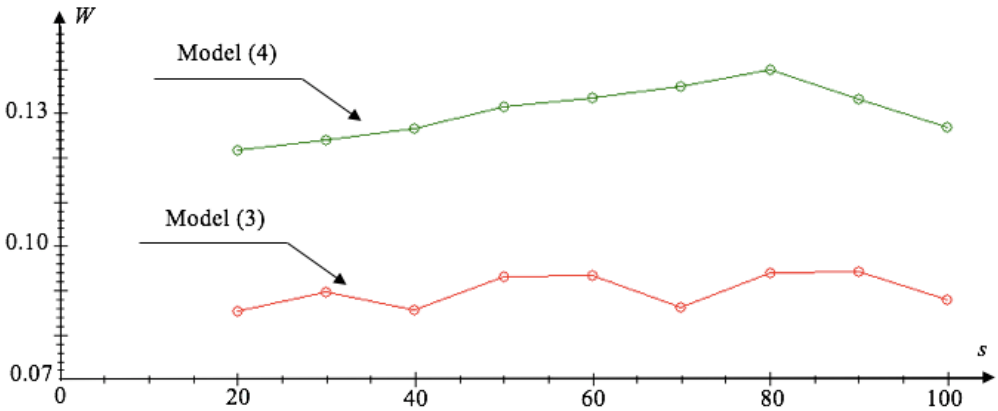


Fig. 4. Relative approximation error graph for different sample sizes

Рис. 4. График относительной ошибки восстановления при различных значениях объема выборки

Table 1

Dependence of the relative approximation error on different noise levels

	W_1 error of the model with correct structure (3)	W_2 error of the model with incorrect structure (4)
Noise level 3 %	0.0611	0.1057
Noise level 5 %	0.0851	0.1356
Noise level 10 %	0.1583	0.1883

The results which are shown in fig. 6, once again indicate that the estimation value of the model (4) coefficient $\hat{\alpha}_2$ calculated with the criterion (5), is practically equal to zero. Besides that, on the basis of fig. 6 it can be seen that the most qualitative description of the object (1) by the model (4) is only in the interval [–1;1]. Going beyond the limits of this interval, the residual error increases.

Similar to the first experiment, we consider the influence of the sample size on the error value (6) at a 5 % noise level, which is shown in fig. 7.

The results in fig. 7 are similar to the results of the first experiment. The only difference is that for the model (4) the error value (6) has increased.

Now we consider the error value (6) for the different noise levels using sample size $s = 100$. The obtained results are summarized in tab. 2.

It can be seen from the results presented in tab. 2, the changed interval of generating input object variables affected the error values. For the model (3) a growth in the level noise from 3 % to 5 % as well as from 5 % to 10 % almost twice increases the error value. For the model (4) the error value also increases with noise level increasing, however, because of its large values, this becomes not essential.

As the third experiment, we implement nonparametric modelling of the object (1). The values of the input variables u_j, $j = 1, \ldots, 4$, as in the previous experiments, we will generate pseudorandom numbers using uniform distribution in the intervals of [0;3] and [–3;3].

In the first case (interval [0,3]), we make nonparametric estimate (7) for which the value of the optimal blur parameter $c_s = 1.1$ was calculated. For the second case interval [–3;3] $c_s = 2.4$. Below, fig. 8 and fig. 9 show the results of nonparametric modelling on the assumption that the sample size is $s = 100$, the noise level is 5 %.

In addition, the error value (6) for different noise levels was calculated. For convenience, we summarize the results in the tab. 3.

Based on the results which are given in tab. 3, we can conclude that the error value (6) for parametric model (4) where the input variables are generated in the interval of [–3,3] is higher than for the model (7). In other cases, the error value (6) for the nonparametric model is higher.

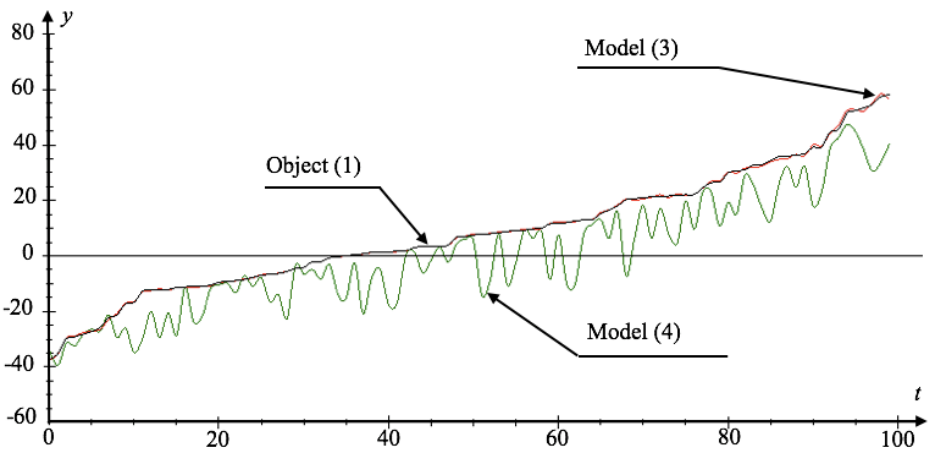


Fig. 5. Graphical dependence of the object (1) and the models (3), (4) outputs in each time-step

Рис. 5. График зависимости выходов (1), (3) и (4) в каждый такт времени

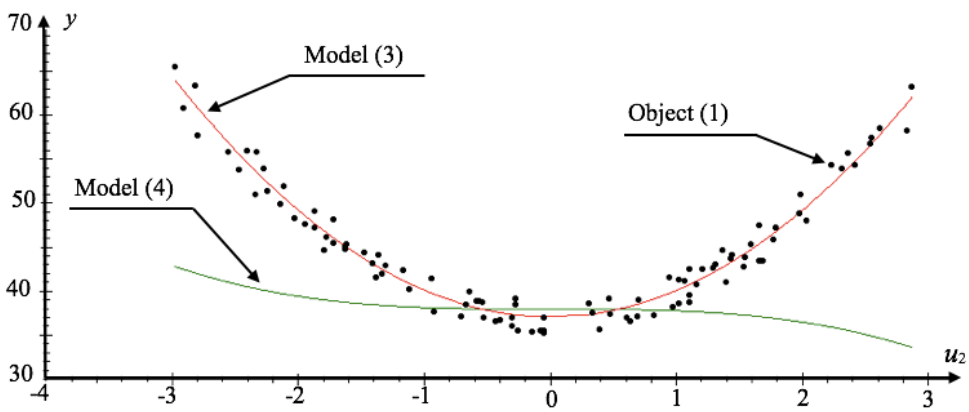


Fig. 6. Dependence of the models (3), (4) and object (1) outputs values on values u_2

Рис. 6. Зависимость значений выходов (1), (3) и (4) от значений u_2

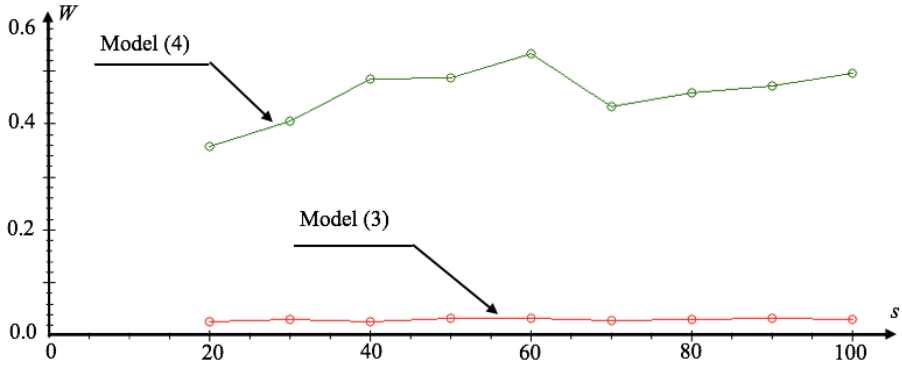


Fig. 7. Relative approximation error graph for different sample sizes

Рис. 7. График относительной ошибки восстановления при различных значениях объема выборки

Table 2

Dependence of the relative approximation error on different noise levels

	W_1 error of the model with correct structure (3)	W_1 error of the model with incorrect structure (4)
Noise level 3 %	0.0151	0.4086
Noise level 5 %	0.0265	0.415
Noise level 10 %	0.0587	0.4651

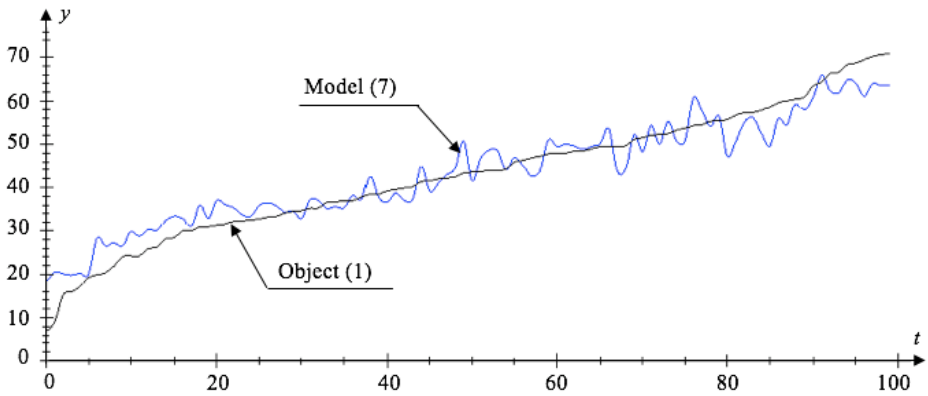


Fig. 8. Graphical dependence of the object output (1) and the model output (7)
in each time-step for the interval of generating the input variables [0;3]

Рис. 8. График зависимости выхода объекта (1) и выхода модели (7)
от времени для интервала генерирования входных переменных [0;3]

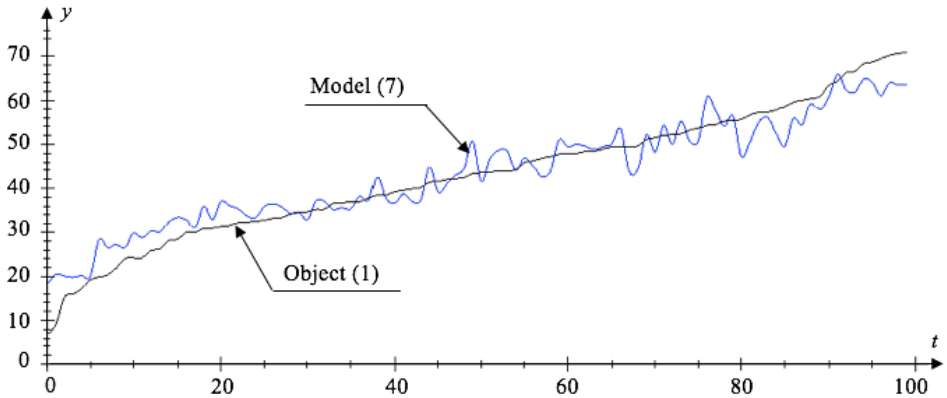


Fig. 9. Graphical dependence of the object output (1) and the model output (7)
in each time-step for the interval of generating the input variables [–3;3]

Рис. 9. График зависимости выхода объекта (1) и выхода модели (7)
от времени для интервала генерирования входных переменных [–3;3]

Table 3

Dependence of the relative approximation error on different noise levels for the nonparametric model

	The error value (6) of the nonparametric model for the generation interval of input variables [0;3]	The error value (6) of the nonparametric model for the generation interval of input variables [–3;3]
Noise level 3 %	0.268	0.279
Noise level 5 %	0.283	0.314
Noise level 10 %	0.328	0.359

Conclusion. Based on the results of the research, it can be concluded that the minor error made in the process of the model structure definition for one variable does not greatly affect the final results of the model output, since the least-squares criterion neutralizes the error by selecting the required coefficients.

The second experiment results showed us that under certain modelling conditions (for example, the modelling range of input variables values), a model with an error in the structure will describe the object inadequately.

The increase in the sample size affects the error value to a less extent, and with a further increase in the number of observations, this value tends to a specific, average value. The noise levels considered in this work have some effect on the error value.

The third experiment results showed us that the nonparametric model estimates the investigated object accurately enough, but it cannot compete with the correct structure parametric model. Despite this, it is more appropriate to use the nonparametric model in conditions of priori information lack. This fact is confirmed by this experiment, the results of which showed that the value of the modelling error for a parametric model with incorrect structure is higher than for a nonparametric model.

References

1. Vaganov M. A., Moskalets O. D., Kulakov S. V. [Multichannel spectral devices for the diagnosis of liquid rocket engines]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2013, No 1 (62), P. 2–6 (In Russ.).

2. Mukhin S. V., Rebenkov A. V. [Prospects for the development of information-measuring and control systems for liquid rocket engine test stand at the chemical plant-branch of “Krasmash”]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnev Readings: materials XIV Intern. scientific. Conf.]. Krasnoyarsk, 2010, Part 1. P. 261–266 (In Russ.).

3. Grop. D. *Metody identifikatsii sistem* [Identification of systems]. Moscow, Mir Publ., 1979, 304 p.

4. Tsypkin Ya. Z. *Informatsionnaya teoriya identifikatsii* [Information theory of identification]. Moscow, Nauka Publ., 1995, 336 p.

5. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 176 p.

6. Tayyebi A., Pijanowski B. C., Linderman M., Gratton C. Comparing three global parametric and local nonparametric models to simulate land use change in diverse areas of the world. *Environmental Modelling & Software*, 2014, No. 59. Available at www.sciencedirect.com/science/journal/13648152.

7. Eykkhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [System identification parameter and state estimation]. Moscow, Mir Publ., 1975, 696 p.

8. Seydzh E. P., Melsa Dzh. L. *Identifikatsiya sistem upravleniya* [System Identification]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 248 p.

9. Raybman N. S. *Chto takoe identifikatsiya?* [What does identification mean?]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 118 p.

10. Shteynberg Sh. E. *Identifikatsiya v sistemakh upravleniya* [Identification in control systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 80 p.

11. Myshlyaev L. P., L’vova E. I., Ivushkin K. A., Ageeva D. A. [Synthesis and investigation of identification algorithms on the basis of closed-loop dynamic systems]. *Proc. of the X international conference “System identification and control problems”*. Moscow, 2015, P. 397–418 (In Russ.).

12. Odnol’ko D. S. [Parameter identification of induction motor consisting of a frequency-regulated electric drive with a stationary rotor]. *Vestnik Gomel’skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. PO Sukhogo.* 2014, No 2, P. 51–59 (In Russ.).

13. Trofimov V. B., Kulakov S. M. *Intellektual’nye avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi ob’’ektami* [Intelligent automated control systems of technological objects]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2016, P. 51–59.

14. Korneeva A. A., Chzhan E. A. [About the parametric modelling of stochastic objects]. *Vestnik SibGAU.* 2013, No. 2 (48), P. 39–42 (In Russ.).

15. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie otsenki plotnosti veroyatnosti i krivoy regressii* [Non-parametric estimation of the probability density and the regression curve]. Tbilisi, Tbilisi University Publ., 1983, 194 p.

Библиографические ссылки

1. Ваганов М. А., Москалец О. Д., Кулаков С. В. Многоканальный спектральный прибор для диагностики жидкостного ракетного двигателя // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1 (62). С. 2–6.

2. Мухин С. В., Ребенков А. В. Перспективы развития информационно-измерительных и управляющих систем для испытания жидкостного ракетного двигателя на стенде химзавода – филиала ОАО «Красмаш» // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф. (10–12 нояб. 2010, г. Красноярск) / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. Ч. 1. С. 261–266.

3. Гроп Д. Методы идентификации систем. М. : Мир, 1979. 304 с.

4. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М. : Наука, 1995. 336 с.

5. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 176 с.

6. Comparing three global parametric and local non-parametric models to simulate land use change in diverse areas of the world / A. Tayyebi [et al.] // Environmental Modelling & Software. 2014. No. 59. URL: www.sciencedirect.com/science/journal/13648152.

7. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 686 с.

8. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. М. : Наука, 1974. 248 с.

9. Райбман Н. С. Что такое идентификация? М. : Наука, 1970. 118 с.

10. Штейнберг Ш. Е. Идентификация в системах управления. М. : Энергоатомиздат, 1987. 80 с.

11. Синтез и исследование алгоритмов идентификации на базе замкнутых динамических систем / Л. П. Мышляев [и др.] // Идентификация систем и задачи управления : материалы X Междунар. науч. конф. (26–29 янв. 2015, г. Москва) / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова. М., 2015. С. 397–418.

12. Однолько Д. С. Параметрическая идентификация асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода при неподвижном роторе // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2014. № 2 (57). С. 51–59.

13. Трофимов В. Б., Кулаков С. М. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами. М. : Инфра-Инженерия, 2016. 232 с.

14. Корнеева А. А., Чжан Е. А. О параметрическом моделировании стохастических объектов // Вестник СибГАУ. 2013. №. 2 (48). С. 39–42.

15. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1983. 194 с.

© Denisov M. A., Chzhan E. A., 2017

UDC 004.93

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 736–743

COMPREHENSIVE METHOD FOR MULTIMODAL DATA ANALYSIS BASED ON OPTIMIZATION APPROACH

I. A. Ivanov*, C. Yu. Brester, E. A. Sopov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskiy Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: ilyaiv92@gmail.com

In this work we propose a comprehensive method for solving multimodal data analysis problems. This method involves multimodal data fusion techniques, multi-objective approach to feature selection and neural network ensemble optimization, as well as convolutional neural networks trained with hybrid learning algorithm that includes consecutive use of the genetic optimization algorithm and the back-propagation algorithm. This method is aimed at using different available channels of information and fusing them at data-level and decision-level for achieving better classification accuracy of the target problem. We tested the proposed method on the emotion recognition problem. SAVEE (Surrey Audio-Visual Expressed Emotions) database was used as the raw input data, containing visual markers dataset, audio features dataset and the combined audio-visual dataset. During the experiments, the following variable parameters have been used: multi-objective optimization algorithm – SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), NSGA-2 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm), VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm), SelfCOMOGA (Self-configuring Co-evolutionary Multi-Objective Genetic Algorithm), classifier ensemble output fusion scheme – voting, averaging class probabilities, meta-classification, as well as resolution of the images used as input for the convolutional neural network. The highest emotion recognition accuracy achieved with the proposed method on visual markers data is 65.8 %, on audio features data – 52.3 %, on audio-visual data – 71 %. Overall, SelfCOMOGA algorithm and meta-classification fusion scheme proved to be the most effective algorithms used as part of the proposed comprehensive method. Using the combined audio-visual data allowed to improve the emotion recognition rate compared to using just visual or just audio data.

Keywords: multimodal data analysis, multi-objective optimization, feature selection, neural network ensemble, convolutional neural network, evolutionary optimization algorithms.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 736–743

ОБОБЩЕННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПОДХОДА

И. А. Иванов*, К. Ю. Брестер, Е. А. Сопов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: ilyaiv92@gmail.com

Предложен обобщенный метод решения задач анализа мультимодальных данных. Данный метод включает в себя использование различных способов слияния мультимодальных данных, многокритериальный подход к отбору признаков и оптимизации ансамбля нейронных сетей, а также применение конволюционных нейронных сетей, обученных с помощью гибридного алгоритма обучения, в котором последовательно используются генетический алгоритм оптимизации и алгоритм обратного распространения ошибки. Цель данного метода – использование различных имеющихся каналов информации, слияние информации на уровне данных и на уровне классификаторов для повышения конечной точности решения задачи классификации. Предложенный метод был протестирован на задаче распознавания эмоций. В качестве входных данных была использована база данных SAVEE (Surrey Audio-Visual Expressed emotions), которая содержит выборку координат лицевых маркеров, выборку аудиопризнаков и объединенную выборку аудиовидеопризнаков. В ходе проведения экспериментов варьируемыми параметрами выступали используемый алгоритм многокритериальной оптимизации SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), NSGA-2 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm), VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm), SelfCOMOGA (Self-configuring Co-evolutionary Multi-Objective Genetic Algorithm), схема объединения выходов классификаторов в коллектив – голосование, усреднение вероятностей классов, мета-классификация, а также размерность изображений, подаваемых на вход конволюционной нейронной сети. Наилучшая точность распознавания эмоций, которую удалось достичь с помощью предложенного метода, составляет 65,8 % с использованием координат лицевых маркеров, 52,3 % – с использованием аудиоданных,

71 % – с использованием аудиовидеоданных. В целом, алгоритм SelfCOMOGA и метод слияния – метаклассификация оказались наиболее эффективными алгоритмами в составе предложенного обобщенного метода. Использование объединенных аудиовидеоданных позволило улучшить точность распознавания эмоций по сравнению с использованием только видеоданных либо только аудиоданных.

Ключевые слова: анализ мультимодальных данных, многокритериальная оптимизация, отбор признаков, ансамбль нейронных сетей, конволюционная нейронная сеть, эволюционные алгоритмы оптимизации.

Introduction. Nowadays, data powers most of the artificial intelligence applications that are used to solve a wide range of practical problems – from hand-written digit recognition to medical image analysis. However, most data that is generated in the real world, has many modalities, or in other words, channels of perception. E. g., humans perceive the surrounding world through images, sounds, smells, tastes and touch.

Machines, on the other hand, are capable to register much more modalities that ultimately can be represented in a quantitative format. The big question is how to make all these modalities helpful to machines in their goal of better perception of the surrounding world. More specifically, the goal is to develop the algorithms that would combine all the available multimodal data and solve the practical problems more efficiently [1].

In this work we describe the comprehensive approach for multimodal data analysis and test it on the problem of automatic human emotion recognition. This problem deals with three data modalities: separate frames of a video sequence depicting the speaker's face, marker coordinates of the main facial landmarks of speakers, and audio features of the speaker's voice. The purpose of this work is to test empirically if combining multimodal data would help increase the effectiveness of automated human emotion recognition.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 includes an overview of the significant related work on the topic of multimodal data fusion for machine learning problems. In Section 3 the proposed comprehensive approach is described. Section 4 provides information regarding the dataset used. Section 5 includes the results of testing the proposed approach on the emotion recognition problem. Finally, Section 6 provides the summary of the results and future work.

Significant related work. The idea of constructing ensembles of base learners is popular today among machine learning researchers. Partly this can be explained by the lower calculation cost constraints. For many cases it has been shown that combining several base learners into ensemble helped to improve the overall system performance.

E. g., neural networks proved to be effective for solving practical problems of supervised and reinforcement learning when combined into ensembles [2; 3]. The question of using optimization algorithms, including stochastic optimization, for neural network training and optimal structure selection was also surveyed [4].

The problem of dimensionality reduction is also vital for building efficient machine learning systems. Apart from the standard methods like principal component analysis (PCA) [5], feature selection methods have become equally effective and practically applicable to a wide range of problems [6]. Specifically, wrapper methods based on single-objective and multi-objective optimization algorithms are used [7].

The emotion recognition problem can be formulated in different ways based on the practical needs:

1. Two emotion classes – "angry", "not angry". Practical usage – automated call centers, surveillance systems.
2. Determination of user's degree of agitation. Practical usage – automated "awake"–"asleep" classification for drivers in order to prevent car accidents.
3. Seven emotion classes – neutral, happiness, anger, sadness, surprise, fear, disgust. Practical usage – automatic data collection for sentiment analysis.

In this work we use SAVEE (Surray Audio-Visual Expressed Emotion) database [8] for solving the emotion recognition problem. This database was initially created for doing research on the problem of audio-visual data fusion in terms of emotion recognition.

The problem of multimodal data fusion for automatic emotion recognition is well represented among researchers [9–11]. They use various data modalities like facial markers, voice audio features, raw facial images, EEG (electroencephalogram) data, eyeball movement data, etc [12; 13]. Nevertheless, the emotion recognition problem is not completely solved nowadays.

Methodology. The proposed comprehensive approach for multimodal data analysis includes two types of multimodal information fusion – data-level (fig. 1) and decision-level (fig. 2). Data-level fusion simply combines several unimodal datasets into the multimodal dataset, whereas decision-level fusion involves training several machine learning algorithms on unimodal datasets and then combining them into an ensemble and fusing their outputs.

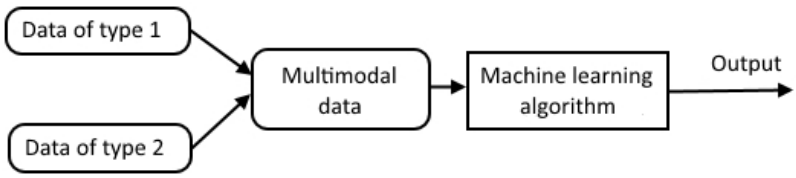


Fig. 1. Data-level multimodal information fusion

Рис. 1. Слияние мультимодальной информации на уровне данных

The diagram of the proposed comprehensive approach in terms of the emotion recognition problem is presented in fig. 3. The input data consists of the audio features extracted from a speech audio signal, facial marker coordinates, and separate video frames extracted from a video sequence. These data modalities are thoroughly described in Section 4.

Audio features and facial markers are fused on the data-level and provided as an input to the multi-objective feature selection procedure, which is described in Subsection 3.1. The output of this procedure are the feature sets optimized according to 2 criteria – the emotion recognition rate is maximized and the number of features used is minimized.

The feature set that provided the best emotion recognition rate is selected and passed further to the procedure of multi-objective design of neural networks (NN) ensemble (discussed in detail in Subsection 3.2). Both steps – feature selection and NN ensemble design, are performed using the same multi-objective optimization algorithm. The output of this step is the set of neural networks with the optimized parameter values – the number of hidden neurons and the number of training iterations.

The third data modality, namely, the video frames are passed over to the convolutional neural network (CNN) [14] trained with hybrid learning algorithm, briefly described in Subsection 3.3.

The output of CNN is combined on the decision-level with the outputs of optimized neural networks described earlier. The final output is constructed using one of the following schemes:

1. Voting scheme – selects the class that is predicted by the majority of classifiers.
2. Averaging class probabilities – each class posterior probabilities are averaged over all base classifiers, the class with the highest probability is selected as the output.
3. Meta-classification – an additional meta-classification layer is added that takes the class probabilities predicted by the base learners as an input. Support vector machine (SVM) was used as a meta-classifier.

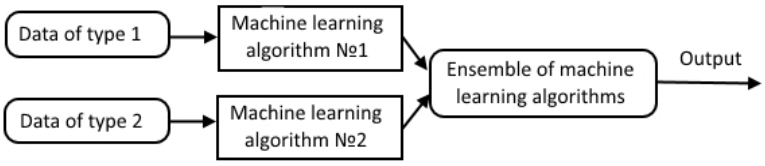


Fig. 2. Decision-level multimodal information fusion

Рис. 2. Слияние мультимодальной информации на уровне классификаторов

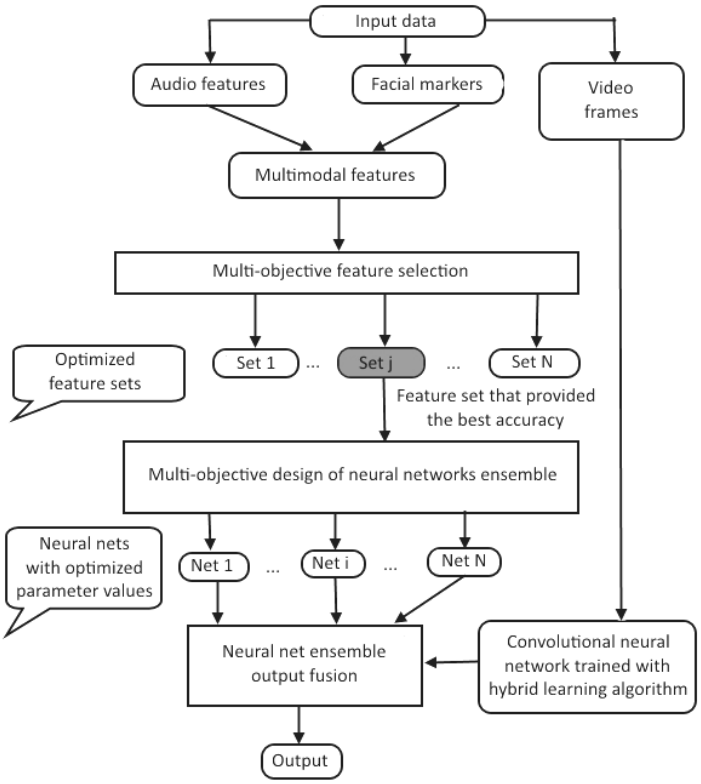


Fig. 3. Diagram of the comprehensive approach for solving multimodal data analysis problems on the example of emotion recognition problem

Рис. 3. Схема обобщенного метода решения задач анализа мультимодальных данных на примере задачи распознавания эмоций

Multi-objective approach to feature selection. The essence of the multi-objective approach to feature selection is in formulating the feature selection problem as a multi-objective optimization problem and solving it with a certain multi-objective optimization algorithm.

In this formulation, there are two conflicting optimization criteria:

1. Classification rate – to be maximized. This criterion is calculated according to the wrapper method scheme. This means that a selected subset of features is passed over to a certain classifier with constant parameter values (neural network in our case), which is trained on the corresponding reduced dataset, and then classification rate is calculated according to its standard formula:

$$R = \frac{n}{N} \cdot 100\ \%, \tag{1}$$

where R is the classification rate, n – number of correctly classified instances, N – total number of instances.

2. Number of selected features – to be minimized. This is explained by the fact that fewer features generally lead to simpler models with higher generalization, therefore the fewer features are preferable.

The input variables for this optimization problem are binary vectors that indicate which features are selected (marked as 1), and which are not (marked as 0).

The class of evolutionary algorithms was chosen for solving the formulated multi-objective optimization problem, specifically, the algorithms SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) [15], VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) [16], NSGA-2 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) [17] and SelfCOMOGA (Self-configuring Co-evolutionary Multi-Objective Genetic Algorithm) [18]. This class of algorithms was chosen due to the fact that they do not require any prior knowledge about the optimized function, therefore, they are a good choice for solving complex multi-objective optimization problems, in which the optimization functions are not explicitly defined. Moreover, all of these algorithms provide the Pareto set estimate as a result of their work, which is useful for the next step of this approach – the design of neural network ensembles.

Multi-objective approach to the design of a neural network ensemble. The design of a neural network ensemble was formulated as the multi-objective optimization problem, in the same manner as the feature selection step. However, the optimized criteria in this case are:

1. Classification rate – to be maximized.
2. Number of hidden neurons – to be minimized. The idea behind this is that neural networks with fewer number of neurons generally have a simpler model structure, thus more robust.

The input variables in this optimization formulation are:

1. Number of hidden neurons.
2. Number of network training iterations.

The optimized subset of features found at the step of feature selection is passed over to the neural networks trained at this step. The same evolutionary multi-objective optimization algorithms were used for neural network optimization. Moreover the same algorithm was used for both steps – feature selection and neural net optimization, for every experiment run.

Hybrid learning algorithm for training convolutional neural networks. The hybrid learning algorithm for training convolutional neural networks (CNN) involve consecutive use of the co-evolutionary genetic optimization algorithm (GA) and the back propagation (BP) algorithm for training the network.

The idea behind this is to combine the two types of search – stochastic and gradient-based. First, GA, which uses a stochastic optimization strategy, is applied to find the potential subspace of the global optimum in the space of CNN weights. The solution found by GA is then used as the starting point for BP – which is a gradient-based procedure, to finalize the search and reach the global optimum.

Experiments were conducted that proved the effectiveness of this hybrid learning algorithm on the emotion recognition problem and on the MNIST hand-written digit recognition problem [19].

Dataset and feature description. SAVEE database was used for solving the emotion recognition problem in this work. This database consists of 480 videos of 4 male English speakers, pronouncing a set of predetermined phrases, imitating 7 basic emotions – anger, disgust, fear, happiness, neutral, sadness, surprise. The distribution of cases across classes is uniform – 15 cases per each emotion for every speaker, except for the neutral emotion – it is represented with 30 cases per speaker.

This database was selected for several reasons:

1. This DB was specifically designed for researching the effectiveness of audio-visual data fusion.
2. It includes videos of emotions of ordinary people, rather than professional actors, therefore it is closer to reality.
3. All 7 basic emotion classes are equally represented in this database.

Three data modalities were extracted from this dataset:

1. Video frames – 5 frames per video were selected, the final class output for the entire video was determined according to the voting scheme across the frames.
2. Audio features – extracted using openSMILE software kit [20]. Extracted features include speaker voice pitch features, energy features, duration features and spectral features. All in all, 930 features were extracted. PCA was applied to them, and 50 most informative components were used as the input data for the classifiers.
3. Facial markers – 60 markers were drawn on the speaker faces marking the main facial landmarks (fig. 4). The marker indicating the tip of nose was selected as the central point, and coordinates of all markers were tracked and registered for each video frame. Coordinates of each marker were averaged across the entire video, and their standard deviation was found, thus totaling in 240 features per video. PCA was applied in the same manner as for the audio features, and 50 most informative components were finally selected.

Also, audio features and facial markers were combined to form the audio-visual multimodal dataset with 100 features.

Experiments setup and results. The experiments were conducted across four different evolutionary multi-objective optimization algorithms applied to the feature selection and the design of neural networks ensemble,

three different decision-level fusion schemes, and four different video frame sizes passed over to the CNN.

The evolutionary optimization algorithms include:

1. SPEA – Strength Pareto Evolutionary Algorithm.
2. NSGA-2 – Non-dominated Sorting Genetic Algorithm.
3. VEGA – Vector Evaluated Genetic Algorithm.
4. SelfCOMOGA – Self-configuring Co-evolutionary Multi-Objective Genetic Algorithm.

The decision-level fusion schemes include:

1) voting;
2) averaging class probabilities;
3) SVM meta-classification.

The video frame sizes include 40×40, 50×50, 70×70 and 100×100 pixels. Besides that, the experiments were conducted across different multimodal input data:

1. Visual markers + video frames.
2. Audio features + video frames.
3. Visual markers + audio features + video frames.

Emotion classification was done in a speaker-independent formulation, when the train and test datasets contain the instances belonging to different speakers. Cassification rate was chosen as a criterion to compare different variants of the developed comprehensive approach. The results are presented in fig. 5–7.

Fig. 4. Example of a video frame from SAVEE DB, face of the speaker is covered with the markers of the main facial landmarks

Рис. 4. Пример видеокадра из базы данных SAVEE, лицо говорящего покрыто маркерами основных точек-ориентиров лица

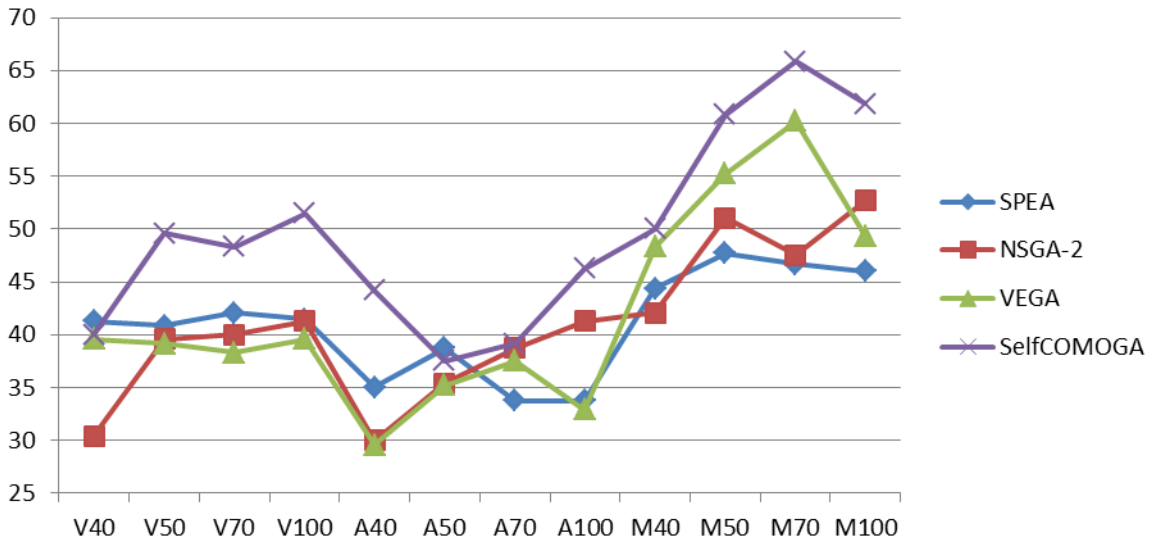


Fig. 5. Emotion classification rate (%), facial markers + video frames input; fusion schemes: V – voting, A – averaging class probabilities, M – meta-classification; video frame resolutions (n×n): n = 40, 50, 70, 100

Рис. 5. Точность классификации эмоций (%), лицевые маркеры + видеокадры на входе; схемы слияния: V – голосование; A – усреднение вероятностей классов; M – метаклассификация; размер видеокадров (n×n): n = 40, 50, 70, 100

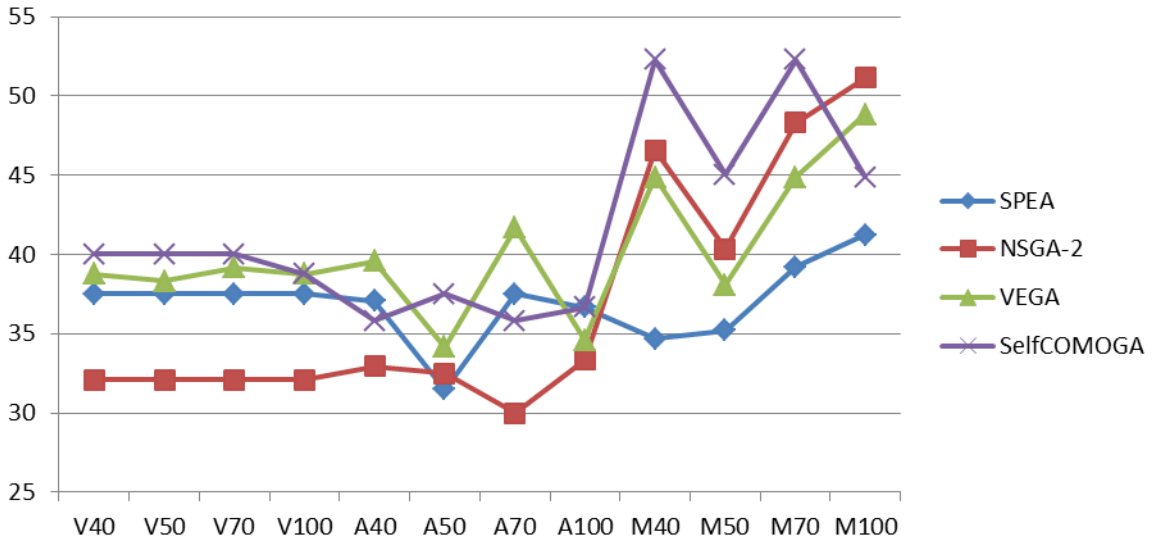


Fig. 6. Emotion classification rate (%), audio features + video frames input; fusion schemes: V – voting, A – averaging class probabilities, M – meta-classification; video frame resolutions ($n \times n$): n = 40, 50, 70, 100

Рис. 6. Точность классификации эмоций (%), аудиопризнаки + видеокадры на входе; схемы слияния: V – голосование; A – усреднение вероятностей классов; M – метаклассификация; размер видеокадров ($n \times n$): n = 40, 50, 70, 100

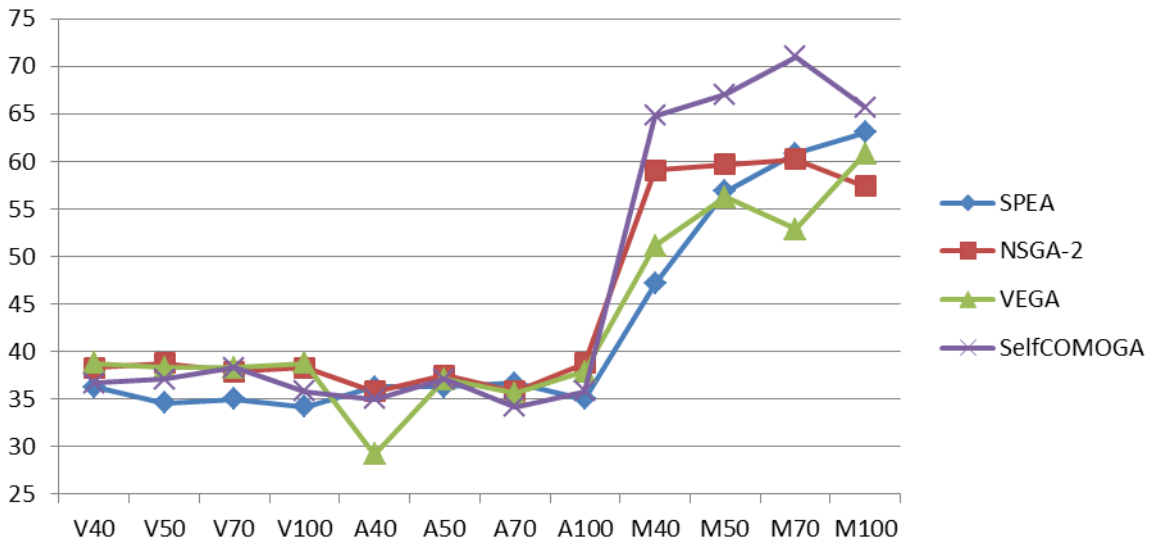


Fig. 7. Emotion classification rate (%), facial markers + audio features + video frames input; fusion schemes: V – voting, A – averaging class probabilities, M – meta-classification; video frame resolutions ($n \times n$): n = 40, 50, 70, 100

Рис. 7. Точность классификации эмоций (%), лицевые маркеры + аудиопризнаки + видеокадры на входе; схемы слияния: V – голосование; A – усреднение вероятностей классов; M – метаклассификация; размер видеокадров ($n \times n$): n = 40, 50, 70, 100

According to the results, the following empirical conclusions can be made regarding the effectiveness of the proposed comprehensive approach applied to the emotion recognition problem:

1. Generally, SVM meta-classification fusion scheme proved to be more effective than voting and averaging.

2. SelfCOMOGA algorithm proved to be the most effective for feature selection and NN ensemble design, especially when coupled with meta-classification fusion scheme.

3. The size of the input video frames passed over to the CNN does not significantly affect the effectiveness of the overall approach.

The best emotion recognition rate achieved with using visual markers along with video frames is 65 %, with audio markers + video frames – 52 %. Fusion of audio

features and visual markers along with video frames provided an increase of the best achieved emotion recognition rate up to 71 %. Therefore, the proposed approach that uses all channels of available information, turned out to be effective in terms of the test emotion recognition problem.

Summary and future work. In this work we described the comprehensive approach for solving multimodal data analysis problems and tested it on the emotion recognition problem.

The advantage of the proposed approach is that it enables to use all available channels of input information in unison. Moreover, this approach is customizable, that is, it can include different optimization algorithms applied to its core procedures – multi-objective feature selection and classifiers ensemble design, different classification algorithms can be used as base learners of an ensemble, different decision-level fusion schemes can be applied.

According to experimental results, the proposed approach proved to be effective for solving the emotion recognition problem, which includes three channels of input data. The best achieved emotion recognition rate in a speaker-independent problem formulation is 71 %. The use of all three channels of input information outperformed the other cases where only a subset of input information as used.

More research needs to be done to check the effectiveness of the proposed approach on other machine learning problems with multiple data modalities.

Acknowledgements. The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research, Government of Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Region Science and Technology Support Fund to the research project № 16-41-243036.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-41-243036.

References

1. Poria S., Cambria E., Gelbukh A. F. Deep convolutional neural network textual features and multiple kernel learning for utterance-level multimodal sentiment analysis. *Proc. of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2015, P. 2539–2544.

2. Fausser S., Schwenker F. Selective neural network ensembles in reinforcement learning: taking the advantage of many agents. *Neurocomputing*. 2015, Vol. 169, P. 350–357.

3. Moretti F., Pizzuti S., Panzieri S., Annunziato M. Urban traffic flow forecasting through statistical and neural network bagging ensemble hybrid modeling. *Neurocomputing*. 2015, Vol. 167, P. 3–7.

4. Zhang L., Suganthan P. N. A survey of randomized algorithms for training neural networks. *Information Sciences*, *364*, 2016, P. 146–155.

5. Wold S., Esbensen K., Geladi P. Principal component analysis. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. 1987, No. 2(1–3), P. 37–52.

6. Chandrashekar G., Sahin F. A survey on feature selection methods. *Computers & Electrical Engineering*. 2014, No. 40(1), P. 16–28.

7. Han M., Ren W. Global mutual information-based feature selection approach using single-objective and multi-objective optimization. *Neurocomputing*. 2015, Vol. 168, P. 47–54.

8. Haq S., Jackson P. J. B. Speaker-dependent audio-visual emotion recognition. *International Conference on Audio-Visual Speech Processing*. 2009, P. 53–58.

9. Busso C., Deng Z., Yildirim S., Bulut M., Lee C. M., Kazemzadeh A., Lee S., Neumann U., Narayanan S. Analysis of emotion recognition using facial expressions, speech and multimodal information. *Proceedings of the 6th international conference on multimodal interfaces*. 2004, P. 205–211.

10. Soleymani M., Pantic M., Pun T. Multimodal emotion recognition in response to videos. *IEEE transactions on affective computing*. 2012, No. 3(2), P. 211–223.

11. Zhang Z., Ringeval F., Dong B., Coutinho E., Marchi E., Schuller B. Enhanced semi-supervised learning for multimodal emotion recognition. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2016, P. 5185–5189.

12. Caridakis G., Castellano G., Kessous L., Raouzaiou A., Malatesta L., Asteriadis S., Karpouzis K. Multimodal emotion recognition from expressive faces, body gestures and speech. *IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations*. 2007, P. 375–388.

13. Sebe N., Cohen I., Gevers T., Huang T. S. Emotion recognition based on joint visual and audio cues. *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*. 2006, No. 1, P. 1136–1139.

14. LeCun Y., Boser B., Denker J. S., Henderson D., Howard R. E., Hubbard W., Jackel L. D. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural computation*. 1989, No. 1(4), P. 541–551.

15. Zitzler E., Thiele L. An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach. Technical Report № 43, *Computer Engineering and Communication Networks Lab*, 1998, 40 p.

16. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, 1985, P. 93–100.

17. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*. 2002, No. 6(2), P. 182–197.

18. Ivanov I. A., Sopov E. A. [Self-configuring genetic algorithm for solving the multi-objective choice support problems]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 1(47), P. 30–35 (In Russ.).

19. LeCun Y., Cortes C., Burges C. J. C. The MNIST database of handwritten digits, 1998.

20. Eyben F., Wullmer M., Schuller B. OpenSMILE – the Munich versatile and fast open-source audio feature extractor. *Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia*. 2010, P. 1459–1462.

Библиографические ссылки

1. Poria S., Cambria E., Gelbukh A. F. Deep convolutional neural network textual features and multiple kernel learning for utterance-level multimodal sentiment analysis // Proc. of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2015. P. 2539–2544.

2. Fausser S., Schwenker F. Selective neural network ensembles in reinforcement learning: taking the advantage of many agents // Neurocomputing, 2015. № 169. P. 350–357.

3. Urban traffic flow forecasting through statistical and neural network bagging ensemble hybrid modeling / F. Moretti [et al.] // Neurocomputing. 2015. № 167. P. 3–7.

4. Zhang L., Suganthan P. N. A survey of randomized algorithms for training neural networks // Information Sciences. 2016. № 364. P. 146–155.

5. Wold S., Esbensen K., Geladi P. Principal component analysis // Chemometrics and intelligent laboratory systems. 1987. № 2(1–3). P. 37–52.

6. Chandrashekar G., Sahin F. A survey on feature selection methods // Computers & Electrical Engineering. 2014. № 40(1). P. 16–28.

7. Han M., Ren W. Global mutual information-based feature selection approach using single-objective and multi-objective optimization // Neurocomputing. 2015. № 168. P. 47–54.

8. Haq S., Jackson P. J. B. Speaker-dependent audio-visual emotion recognition // International Conference on Audio-Visual Speech Processing. 2009. P. 53–58.

9. Analysis of emotion recognition using facial expressions, speech and multimodal information / C. Busso [et al.] // Proceedings of the 6th International Conf. on multimodal interfaces. 2004. P. 205–211.

10. Soleymani M., Pantic M., Pun T. Multimodal emotion recognition in response to videos // IEEE transactions on affective computing. 2012. № 3(2). P. 211–223.

11. Enhanced semi-supervised learning for multimodal emotion recognition / Z. Zhang [et al.] // IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2016. P. 5185–5189.

12. Multimodal emotion recognition from expressive faces, body gestures and speech / G. Caridakis [et al.] // IFIP Intern. Conf. on Artificial Intelligence Applications and Innovations. 2007. P. 375–388.

13. Emotion recognition based on joint visual and audio cues / N. Sebe [et al.] // 18th International Conf. on Pattern Recognition (ICPR'06). 2006. № 1. P. 1136–1139.

14. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition / Y. LeCun [et al.] // Neural computation. 1989. № 1(4). P. 541–551.

15. Zitzler E., Thiele L. An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach // Technical Report № 43, Computer Engineering and Communication Networks Lab. 1998. 40 p.

16. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms // Proceedings of the 1 st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications. 1985. P. 93–100.

17. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb [et al.] // IEEE transactions on evolutionary computation. 2002. № 6(2). P. 182–197.

18. Иванов И. А., Сопов Е. А. Самоконфигурируемый генетический алгоритм решения задач поддержки многокритериального выбора // Вестник СибГАУ. 2013. № 1(47). С. 30–35.

19. LeCun Y., Cortes C., Burges C. J. C. The MNIST database of handwritten digits. 1998.

20. Eyben F., Wullmer M., Schuller B. OpenSMILE – the Munich versatile and fast open-source audio feature extractor // Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimedia. 2010. P. 1459–1462.

© Ivanov I. A., Brester C. Yu., Sopov E. A., 2017

UDC 004.41(075.8)

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 744–747

TO THE QUESTION ON IMPLEMENTATION OF MULTI-VERSION EXECUTION ENVIRONMENT SOFTWARE OF ONBOARD AUTONOMOUS UNMANNED OBJECTS BY MEANS OF REAL-TIME OPERATING SYSTEM

I. V. Kovalev, V. V. Losev, M. V. Saramud*, D. I. Kovalev, M. O. Petrosyan, V. V. Brezitskaya

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: msaramud@gmail.com

The article deals with the functional and algorithmic implementation of multi-version execution environment of modules as components of the onboard software of autonomous pilotless objects by means of real-time operating system. One of the approaches to implementation multi-version execution environment – implementation of the principle of a pseudo-parallelism (imitation of concurrent execution of tasks by dividing the time of their execution) are given. Messaging process between multiple tasks implemented by cycloram, as the procedure of returning of voting result by queuing mechanism.

Keywords: multi-version programming, reliability, real-time operating system, execution environment.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 744–747

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МУЛЬТИВЕРСИОННОЙ СРЕДЫ ИСПОЛНЕНИЯ БОРТОВОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ОБЪЕКТОВ

И. В. Ковалев, В. В. Лосев, М. В. Сарамуд*, Д. И. Ковалев, М. О. Петросян, В. В. Брезицкая

Сибирский государственный университет науки и технологий имени М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: msaramud@gmail.com

Рассматривается функциональная и алгоритмическая реализация мультиверсионной среды исполнения как компонентов встроенного программного обеспечения автономных беспилотных объектов с помощью операционной системы реального времени. Дается один из подходов к реализации мультиверсионной среды исполнения – реализация принципа псевдопараллельности (имитация одновременного выполнения задач путем деления времени их выполнения). Процесс обмена сообщениями между несколькими задачами, представленный в виде циклограммы, использует в качестве средства обмена информацией механизм очередей.

Ключевые слова: мультиверсионная среда исполнения, голосование, задача, циклограмма, сообщения, очереди, надежность.

Introduction. The task of designing and software implementation of multiversion on-board software (OBS) of autonomous unmanned objects (AUO), is not trivial [1; 2]. At the same time, the task of forming a multiversion environment is no less important. There are a number of conditions necessary to ensure the operation of such an environment. Firstly, the implementation of an adequate mechanism of voting [3]. Secondly, to ensure data exchange between software modules. Thirdly, to provide a mechanism for extrusion of module in case that a similar decision is made by the arbitrator, as well as the subsequent addition of a new module, to maintain the specified reliability indicator of OBS AUO.

Search of solution. One of the approaches to implementation multi-version execution environment – implementation of the principle of a pseudo-parallelism. For example – the imitation of parallel execution of tasks by dividing their execution time. Such a functional principle is realized by the real-time operating system RTOS (real-time operating system), namely one of the versions – FreeRTOS [4] ported. This version is portable i. e. adapted for execution on the SoC (System on a Chip) [5].

Consider the schedule (fig. 1) of process of message exchange between multiple tasks implementation. Exchanging process implement procedure of voting result return by queuing mechanism implemented by FreeRTOS.

Task-receiver is a task that realizes the collection of data from *N*-version modules (Task-1, Task-2, …, Task-*N*) with the purpose of subsequent decision by the arbitrator, however, in the described process performing only the receiver function [5; 6].

Task-1, -2 – these are tasks that interpret *N*-version modules [7; 8], which implement functions of OBS AUO.

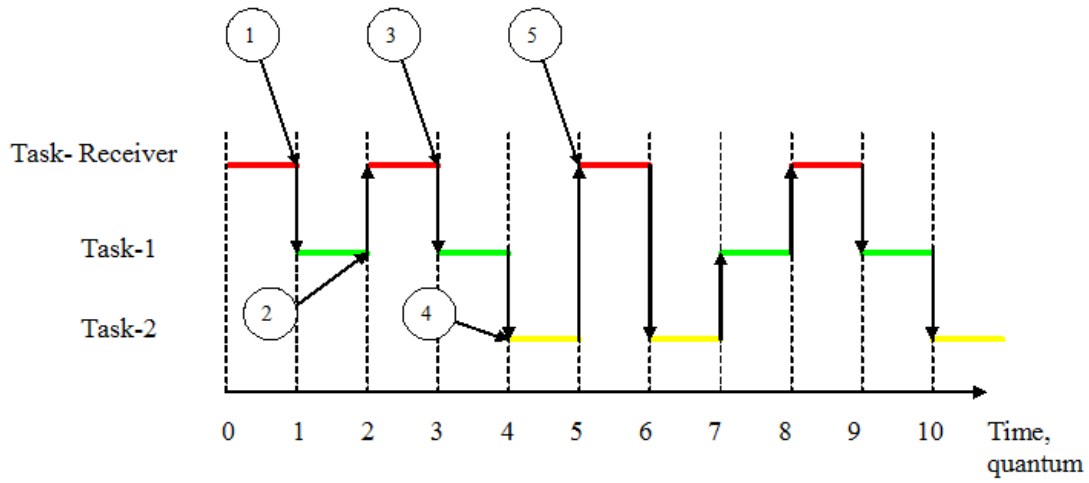


Fig. 1. Cyclogram of message exchange process between multiple tasks

Рис. 1. Циклограмма процесса обмена сообщениями между задачами

Algorithmizing the messaging process. The time component of the given cyclogram is distributed over equal time quanta.

Time point "0" – Initialized launch of FreeRTOS planner, which uses the "execution" status of the task with the highest priority. In this instance it is Task-Receiver (Com. API-function vTaskSrartScheduler() is responsible for the launch of the scheduler, API-function xTaskCreate() is responsible for task creation).

Time point "1" – Task-Receiver initiates an attempt to read an item from the queue, but goes into the "blocking" state, since the queue is empty at the time it was created. In this state Task-Receiver resides until the data occur in the queue, or up to the moment of time-out (120 ms). The next stage is the transition to the "execution" state of one of the Task-transmitters. (Task-1 or Task-2). It is not possible to declare, which task will go into this state, because each of them has equal priority. Let's suppose, this is Task-1 (Com. API-function vTaskSuspend()and vTaskResume() are respectively responsible for transition to the "blocking" state and exit from it).

Time point "2" – Task-1 writes a value "25" in the created empty queue. There is a return from "blocked" state at this point. Main function of this task is to capture data from the queue, and its priority is the highest (Com. API-function xQueueCreate(), is responsible for queue creation. To write an element to the end of the queue – FIFO principle implementation, API-function xQueue-SendToBack() is used, to write an element at the beginning of the queue – FIFO principle implementation, API-function xQueueSendToFront() is used).

Time point "3" – After accessing the queue and reading the data from it, the Trader-receiver is blocked again, since the queue is now empty. Control returns to the interrupted Task-1, which runs by call scheduler API-function taskYIELD() (Com. API-function xQueueReceive(), is responsible for reading element followed by removing it from the queue).

Time point "4" – The scheduler converts to the "execution" state an equitable Task-2, which, in turn, records the value of "50" in the queue.

Time point "5" – Leaves the "blocking" state of the high-priority Task-receiver and reads the data from the queue. Iteration of the loop happens next (Com. The current value of the time quantum counter may be received through API-function *xTaskGetTickCount()*).

Status of tasks during the system operation. The software system running under FreeRTOS, consists of a set of tasks. Tasks carried out separately, and in their own context. The scheduler controls the execution order, the change of tasks and their contexts. Each task has its own stack. Thread context is stored in stack extracted from the stack, when you pause and resume execution, respectively. Fig. 2 shows possible state of tasks. New ready-made task is created by command xTaskCreate(). The scheduler provide it with a time quantum for execution. The scheduler can leave thread in "ready" state if it is possible, taking into account the priorities or until such an opportunity arises. Also it is possible to send to the "blocking" state with the vTaskSuspend() command, from which only the scheduler can issue it by the vTask-Resume() command. From the "execution" state, the task can be transferred back to the "ready" state if it has not finished its work. However, the scheduler can decide to switch the task. For example, if a task with a higher priority has switched to a "ready" state. If the task needs to wait (the appearance of the element in the queue, the release of the mutex, the switching of the traffic light, and so on), then it is translated into the "waiting" state. Which can also be done by the command vTaskDelay(),setting the timeout after which the task goes into the "ready" state. When the expected event appears, the thread will be transferred to the ready state. By vTaskSuspend() command you can send the task from "execution" state to "blocking" state. If several tasks are in the "ready" state, the scheduler executes the task with the highest priority. Herewith tasks with lower priority are executed only after the higher priority task does not go into the "waiting" or "blocking" state. Task in the "waiting" or "blocking" state do not spend CPU time. The main difference between them is that the task in the "blocking" state does not respond to any events. And can be removed from this state only by the vTaskResume () command manually.

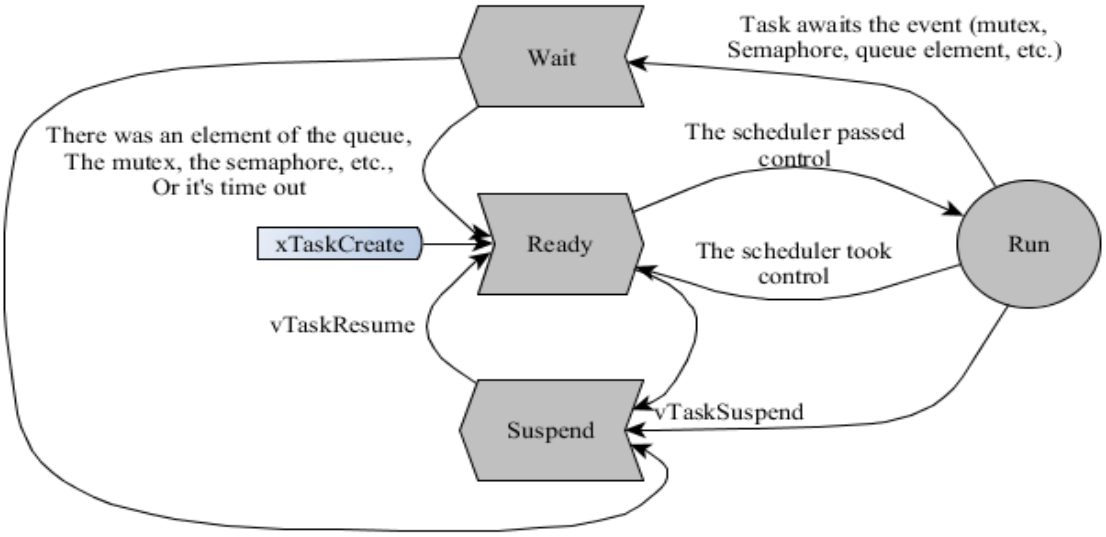


Fig. 2. Possible state of tasks

Рис. 2. Возможные состояния задач

Conclusion. This example demonstrates the messaging mechanism. According to which, value, placed in queue by task, represented by constant. This task interprets *N*-version modules (Task-1, -2). Returned by the module as a result of voting true value, demands additional algorithmization of *N*-version module [9; 10]. While the value generated by the module can take a different format, including the format of both boolean and integer variables [11], depending on voting mechanism [12]. Thus, the messaging mechanism, together with the scheduler, and the priority system implemented by FreeRTOS tools, allow you to build more flexible algorithms of voting, able to vary the weights of *N*-version modules, and as a consequence, affect the reliability of the multiversion software [13], including for the implementation of a multiversion environment for the execution of OBS AUO. In addition, thanks to the priority system, implementation of algorithm for changing the priority of each module, depending on its weight (reliability rating) is possible. This solution in conditions of limited resources will ensure the priority execution of the most error-free versions. Moreover, improve the reliability of the multiversion system in cases where, due to the limitation of the computing resources of the hardware platform, it is impossible to execute all versions within a specified period. Thus, the most reliable versions will not only have more weight in voting, but will be performed first, also. With the help of the priority system, the time limit for issuing answers to versions is limited. Task-receiver with the highest priority through the given time quantum reads all the responses from the queue and deletes (vTaskDelete ()) versions that did not have time to respond in time.

As a result of further analysis of mechanisms of the functioning of FreeRTOS and other real-time operating systems, one can note potential problems:

1. Inversion of priorities – a situation in which Traid-1, which has priority higher than Task-2, expects completion of its work, since Task-2 was the first to capture the mutex. The peculiar feature of the mutex capture is that only the thread that captures the mutex takes the decision to release it. The mutex release occurs only when the thread does its work, regardless of its duration and the priority value of other threads.

2. Interlocking – The situation is possible when several tasks need to access the same resources for its completion:

Task-1 is executed, captures mutex A, its performance is interrupted by Task-2, captures mutex B, tries to capture mutex A, because it is busy, switches to standby, Task-1 continues its execution, tries to capture mutex B, since it is busy, it's also goes into waiting. As a result, both tasks will not release needed mutexes and will be in the standby mode, effectively blocking each other.

We can exclude the occurrence of mutual interlocking during system design. Moreover, we can exclude the inversion of priorities or minimize the negative consequences when it occurs.

References

1. Kovalev I., Semenko T., Tsarev R. *Metodologiya otsenki i povysheniya nadezhnosti programmno-informatsionnykh tekhnologiy i struktur* [The assessment methodology and improve the reliability of software and information technologies and structures]. Krasnoyarsk, Feder. agentstvo po obrazovaniyu, Krasnoyar. gos. tekhn. un-t Publ., 2005, 160 p.

2. Kovalev I. V. Multiversion environment creation for control algorithm execution by autonomous unmanned objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering V International Workshop on Mathematical Models and their Applications.* 2016 7–9 November 2016, Krasnoyarsk, Russia. Vol. 173 (2017), 012025.

3. Kovalev I. [Analysis of problems in the field of research of software reliability: the multistage and the architectural aspect]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 3 (55), P. 78–92 (In Russ.).

4. Stel'makh V. O., Kovalev I. V. [Building fault-tolerant control systems based on the multiversion approach]. *Materialy vserossiiskoi molodezhnoi konferentsii "Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy i tekhnologii (ITSIT-2012)"*. 2012. P. 172–173.

5. Kovalev P. V. [Graphoanalytical method for analyzing the multiversion software architectures]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii, Akademiya estestvoznaniya*. 2009. No. 6, P. 70 (In Russ.).

6. Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S. The minimization of inter-module interface for the achievement of reliability of multi-version software IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 17. XVII International Scientific Conference "Reshetnev Readings" 2015. P. 012006.

7. Kovalev I. V., Zelenkov P. V., Tsarev M. Y. The control of developing a structure of a catastrophe-resistant system of information processing and control IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 17. XVII International Scientific Conference "Reshetnev Readings" 2015. P. 012008.

8. Kovalev I. V. [Multiversioned views method for increasing software reliability information and telecommunication technologies in corporate structures]. *Telekommunikacii i informatizaciya obrazovaniya*. 2003, No. 2, P. 50–55 (In Russ.).

9. Kovalev I. V., Dgioeva N. N., Slobodin M. Ju. The mathematical system model for the problem of multiversion software design Proceedings of Modelling and Simulation, MS'2004 AMSE : Intern. Conf. on Modelling and Simulation, MS'2004. AMSE, French Research Council, CNRS, Rhone-Alpes Region, Hospitals of Lyon. Lyon-Villeurbanne, 2004.

10. Kovalev I. V., Slobodin M. Ju., Stupina A. A. [Mathematical formulation of the problem of designing *n*-version software systems]. *Problemy mashinostroenija i avtomatizacii*. 2005, No. 3, P. 16–23 (In Russ.).

11. Engel E. A., Kovalev I. V. [Information processing using intelligent algorithms by solving wcci 2010 tasks]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 3, P. 4–8 (In Russ.).

12. Kovalev I. Evaluation of the reliability of ACS with blocking protection modules. *The Devices.* 2013, No. 6, P. 20–23.

13. Saramud M. V., Zelenkov P. V., Kovalev I. V., Kovalev D. I., Bresizkaja V. V. Characteristics of software module reliability XVII International Scientific Conference "Reshetnev Readings" 2015, P. 87–88.

Библиографические ссылки

1. Ковалев И. В., Семенько Т. И., Царев Р. Ю. Методология оценки и повышения надежности программно-информационных технологий и структур / Федер. агентство по образованию ; Краснояр. гос. техн. ун-т. Красноярк, 2005. 160 с.

2. Multiversion environment creation for control algorithm execution by autonomous unmanned objects / I. V. Kovalev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering V International Workshop on Mathematical Models and their Applications 2016 (7–9 November 2016, Krasnoyarsk). 2017. Vol. 173. P. 012025.

3. Ковалев И. В. Анализ проблем в области исследования надежности программного обеспечения: многоэтапность и архитектурный аспект // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. № 3 (55). С. 78–92.

4. Стельмах В. О., Ковалев И. В. Построение отказоустойчивых систем управления на основе мультиверсионного подхода // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСИТ-2012) : материалы Всерос. молодеж. конф. 2012. С. 172–173.

5. Ковалёв П. В. Графоаналитический метод анализа мультиверсионных архитектур программного обеспечения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2009. № 6. С. 70.

6. Kovalev I., Zelenkov P., Ognerubov S. The minimization of inter-module interface for the achievement of reliability of multi-version software // Reshetnev Readings: IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering, 17. 2015. P. 012006.

7. Kovalev I. V., Zelenkov P. V., Tsarev M. Y. The control of developing a structure of a catastrophe-resistant system of information processing and control // Reshetnev Readings: IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering, 17. 2015. P. 012008.

8. Ковалев И. В., Юнусов Р. В. Мультиверсионный метод повышения программной надежности информационно-телекоммуникационных технологий в корпоративных структурах // Телекоммуникации и информатизация образования. 2003. № 2. С. 50–55.

9. Kovalev I. V., Dgioeva N. N., Slobodin M. Ju. The mathematical system model for the problem of multiversion software design // International Conference on Modelling and Simulation, MS'2004. AMSE / French Research Council, CNRS, Rhone-Alpes Region, Hospitals of Lyon. Lyon-Villeurbanne, 2004.

10. Ковалев И. В., Слободин М. Ю., Ступина А. А. Математическая постановка задачи проектирования *n*-версионных программных систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2005. № 3. С. 16–23.

11. Engel E. A., Kovalev I. V. Information processing using intelligent algorithms by solving wcci 2010 tasks // Вестник СибГАУ. 2011. № 3. С. 4–8.

12. Оценка надежности АСУ с блокирующими модулями защиты / И. В. Ковалев [и др.] // Приборы. 2013. № 6. С. 20–23.

13. Характеристика надежности программных модулей / М. В. Сарамуд [и др.] // Материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 55-летию Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева / СибГАУ. Красноярск, 2015. Ч. 2. С. 87–88.

© Kovalev I. V., Losev V. V., Saramud M. V.,
Kovalev D. I., Petrosyan M. O., Brezitskaya V. V., 2017

UDC 62.501

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 748–753

ON NONPARAMETRIC ALGORITHMS OF OBJECT GROUPS CONTROL

M. E. Kornet*, A. S. Orlova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: marya.kornet@gmail.com

The paper is devoted to the identification and control of a group of both identical and varied objects. First the control system of a local object is considered. Further on, all random factors acting in the measurement channels of an object are omitted and only the relationships between objects are preserved. Nonparametric algorithms of identification and control are given in a rather general form. The main attention is paid to different relationships between local objects. First the simplest case is considered, that is, a serial technological chain for whose control it is offered to use an external circuit of control when control influences in an external circuit play the role of a setting influence of local systems. The group of objects of a parallel-serial type is the following in complexity and here some feature inherent in many variables figuring in the corresponding section of a group of objects shows itself. This essential feature is that the output variables are measured with different discreteness, and the discreteness of control can significantly vary, including hours, shifts, days and weeks, depending on the nature of the production process and the scheme of measurement and control of corresponding variables. For example, the fineness of grinding in the production of cement is measured several times per shift, and the activity of cement showing its brand is determined only after 28 days. This circumstance should be taken into account when developing computer systems for identification, control and decision-making. The most difficult are such groups that fit into the scheme of interrelated objects, where feedback takes place in the technological process. The external control circuit can have a hierarchical structure, where the number of hierarchies is related to technical-economic, production-economic factors and in active systems to social factors as well. Control of such complexes is a complicated task, where the application of the theory of adaptive and learning systems is justified. This paper considers a class of algorithms of a non-parametric type, i.e. algorithms oriented to the case when information for describing objects is insufficient for parameterization, i.e. selection up to a set of vector parameters. Similar algorithms are presented in a rather general way. As a result, some cases of using control systems for groups of objects for thermal power plants are considered, and condensed information is provided for the metallurgical processing of the Norilsk Combine.

Keywords: a priori information, a group of mutually connected objects, active systems, a complex of non-parametric models.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 748–753

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ ОБЪЕКТОВ

М. Е. Корнет*, А. С. Орлова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037 г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: marya.kornet@gmail.com

Рассмотрена идентификация и управление группой объектов как идентичными, так и разнотипными. Сначала рассматривается система управления локальным объектом. В дальнейшем все случайные факторы, действующие в каналах измерения на объект, опущены, и сохраняются только связи между объектами. Также приводятся непараметрические алгоритмы идентификации и управления в достаточно общей форме. Основное внимание уделяется вопросам различных связей между локальными объектами. Первоначально рассматривается случай наиболее простой – это последовательная технологическая цепочка, для управления которой предлагается использовать внешний контур управления, когда роль управляющих воздействий во внешнем контуре играет роль задающего воздействия локальных систем. Следующей по сложности является группа объектов параллельно-последовательного типа, и здесь проявляется некоторая особенность, присущая многим переменным, фигурирующим в соответствующем сечении группы объектов. Эта существенная особенность в том, что выходные переменные измеряются с различной дискретностью, причем дискретность контроля может существенно отличаться, это могут быть часы, смена, сутки и недели, в зависимости от характера того или иного производства и схемы измерения и контроля соответствующих переменных. Например, тонкость измельчения помола при производстве цемента измеряется несколько раз в смену, а активность

цемента, показывающая его марку, определяется только через 28 суток. Это обстоятельство должно учитываться при разработке компьютерных систем идентификации, управления и принятия решений. Наиболее сложными являются такие группы, которые укладываются в схему взаимосвязанных объектов, где в технологическом процессе имеют место обратные связи. Внешний контур управления может иметь иерархическую структуру, где число иерархий связанно с технико-экономическими, производственно-экономическими, а в активных системах – еще и с социальными факторами. Управление такими комплексами является сложной задачей, где оправданно применение теории адаптивных и обучающихся систем. Рассматривается класс алгоритмов непараметрического типа, т. е. алгоритмов, ориентированных на случай, когда информация для описания объектов недостаточна для параметризации, т. е. выбора с точностью до набора вектора параметров. Подобные алгоритмы приведены в достаточно общем виде. В итоге рассматриваются некоторые случаи использования систем управления групп объектов для теплоэлектростанций и приводятся сжатые сведения для обогатительного металлургического передела Норильского комбината.

Ключевые слова: априорная информация, группа взаимосвязанных объектов, активные системы, комплекс непараметрических моделей.

Introduction. The paper is devoted to control of a group of static and dynamic objects in conditions of both parametric and nonparametric indeterminacy. The identification problem is one of the major ones in the control theory and is also closely related to the amount of information a researcher has at the stage of setting appropriate identification tasks. The control of a group of objects should be based on the following principles:

– collection of a priori information and analysis of current information about the process under investigation;

– mathematical formulation of the problem, assuming certain assumptions;

– synthesis of appropriate control algorithms.

The classical control problem. At first the control task is considered in the standard setting [1]. The task is viewed as a certain local object (fig. 1).

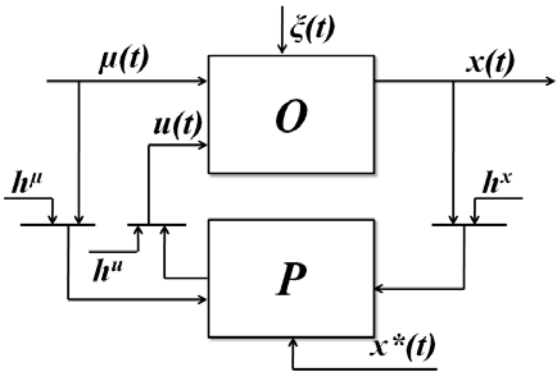


Fig. 1. The general control scheme

Рис. 1. Общая схема управления

The fig. 1 shows the following designations: O is an object, P is a regulator, $u(t) = (u_1(t), ..., u_n(t))$ $\Omega(u) \subset R^n$, $x(t) = (x_1(t), ..., x_n(t))$, $\Omega(x) \subset R^k$, $\mu(t) = (\mu_1(t), ..., \mu_n(t))$, $\Omega(\mu) \subset R^m$, the input variable $\mu(t)$ is monitored, but not controlled, $x^*(t)$ is a setting impact. Random perturbations h^u, h^μ, h^x are errors in the measurement of variables, and $\xi(t)$ is the random perturbation affecting an object. The scheme has a local character [2]; further all random variables will be omitted for simplicity. In identification of such objects the models can have the following appearance: $\hat{x}(u, \mu) = F(u, \mu, \alpha)$ is in case of a parametric setting, or $x_s(u, \mu) = S(u, \mu, \vec{u_s}, \vec{x_s}, \vec{\mu_s})$ in case of a nonparametric setting. Here $\vec{u_s}$, $\vec{x_s}$, $\vec{\mu_s}$ are temporal vectors equal to $\vec{x_s} = (x_1, x_2, \ldots, x_s)$, $\vec{u_s} = (u_1, u_2, \ldots, u_s)$, $\vec{\mu_s} = (\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_s)$ respectively [3; 4]. Nonparametric models are commonly expressed by the following formula:

$$x_{sl}(u,\mu) = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_{li} \prod_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{c_s}\right) \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_{ji}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{n} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{c_s}\right) \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_{ji}}{c_s}\right)}, \quad l = \overline{1,k} \tag{1}$$

and control algorithms will be expressed like this:

$$u_{sl}(x,\mu) = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_{li} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_j^* - x_{ji}}{c_s}\right) \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_{ji}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_j^* - x_{ji}}{c_s}\right) \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_{ji}}{c_s}\right)}, \quad l = \overline{1,n}. \tag{2}$$

Groups of objects. Further on groups of objects will be considered, in particular the simplest of them is a group of serial objects shown in fig. 2. For simplicity, random perturbations acting in channels of measurements and affecting an object are not presented any more, though they are surely present.

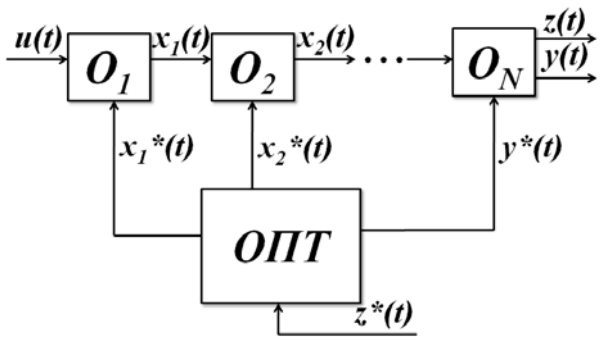


Fig. 2. The scheme of serial objects

Рис. 2. Схема последовательных объектов

Here O_1, O_2, ..., O_N objects are shown in a general view and each of them may contain the macro object shown in fig. 1, where *ОПТ* is the optimizer. $X_1^*(t)$, $x_2^*(t)$, ..., $x_N^*(t)$, $y^*(t)$ are controlling variables for the optimizer. The purpose of the optimizer is to find the controlling impacts $x_1^*(t)$, $x_2^*(t)$, ..., $x_N^*(t)$, $y^*(t)$, for achieving $z^*(t) \approx z(t)$. $Z(t)$ is the most important output variable which characterizes the result of the work of the whole group of objects. It is important to note that the discreetness of measurements $z(t)$, $y(t)$ and $x(t)$ can significantly differ. Therefore the accelerated forecast $z(t)$ is often used in such systems; it is this value that creates the cost of the final product. The measurement discreetness $z(t)$ is the greatest of all variables and can be equal to days, weeks, and sometimes reaches a month. The optimization task takes the following form:

$$R = M_\xi \left\{ \sum_{i=1}^{k} \alpha_i f_i(\mu, u, \xi) \right\}, \tag{3}$$

where R is a utility function; $f_i(x,u)$, $i = \overline{1,k}$, is a set of quality criteria which are created on the basis of the model of the researched process $x_i = \varphi(\mu,u)$, $i = \overline{1,k}$; in their turn, φ_i, $i = \overline{1,k}$ are continuous functions; α_i is a weight factor which is defined by the decision-maker.

The following restrictions were adopted in the utility function:

$$\begin{aligned} &M_\xi \{\varphi(\mu,u,\xi)\} \geq 0,\ j = \overline{1,\lambda}, \\ &M_\xi \{\varphi(\mu,u,\xi)\} = 0,\ j = \overline{1,\sigma}, \end{aligned} \tag{4}$$

where ξ is random perturbations with unknown probability density $P(\xi)$.

Then the algorithm of computation u^j_p, $j = \overline{1,m}$, can have the following appearance:

$$u_p^j = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_i^j \alpha_{tps}}{\sum_{i=1}^{s} \alpha_{tps}}, \tag{5}$$

$$\alpha_{tps} = \prod_{v=1}^{k} \Phi\left(\frac{f_v(\mu_t, u_t)}{c_s^f} \right) \prod_{v=1}^{m} \Phi\left(\frac{f_v(\mu_t, \mu_v^t)}{c_s^\mu} \right) \times$$

$$\times \prod_{j=1}^{v} \Phi\left(\frac{\Psi_j(\mu_t, u_t)}{c_s^\Psi} \right) \prod_{j=1}^{\lambda} \frac{\operatorname{sng} \varphi_j(\mu_t, u_t)}{c_s^\varphi}. \tag{6}$$

In case of appearance of a decision-making problem, algorithms (5), (6) can be slightly changed. It is caused by the fact that in this case it is necessary to consider learning selection limitation and as a result of it the absence of blur coefficients aspiration to zero with the increase of s. In this case it is more expedient to present the algorithm of decision-making (6) in the following form:

$$\alpha_{tps} = \prod_{v=1}^{k} W\left(\gamma_{vp} \cdot f_v(\mu_t, u_t)\right) \prod_{v=1}^{m} W\left(\gamma_{vp} \cdot (\mu_v - \mu_v^t)\right) \times$$

$$\times \prod_{j=1}^{v} W\left(\gamma_{vp} \cdot \Psi_j(\mu_t, u_t)\right) \prod_{j=1}^{\lambda} \operatorname{sng} \varphi_j(\mu_t, u_t), \tag{7}$$

where $W(\cdot)$ function is an analog of $\Phi(\cdot)$, and γ_{vp} coefficients are a peculiar analog of the blur coefficients playing the role of weight factors in this case [5].

The parallel-serial scheme (fig. 3) of technological devices interaction which is often met at the enterprises of a discrete-continuous type is more complicated [6–8].

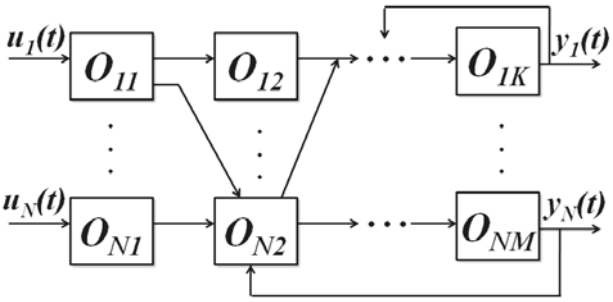


Fig. 3. The parallel-serial objects scheme

Рис. 3. Схема параллельно-последовательных объектов

The following designations are accepted in the fig. 3: N is a number of process lines; all designations of technological variables are excluded for simplicity, generally the emphasis is placed on communication of technological chains.

Finally, an interdependent technological process illustrated in fig. 4 is the most complicated one.

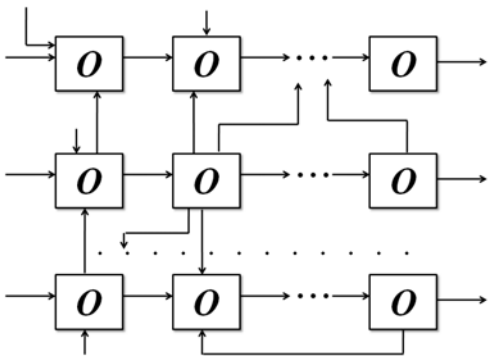


Fig. 4. The scheme of interdependent objects

Рис. 4. Схема взаимосвязанных объектов

The most important here are technological communications between industrial facilities, which are not described separately in the paper. Any technological variables are not described as well [9].

Similar processes are also met in the active systems. Researchers have paid much attention to them lately. Active systems include processes with involvement of a man or a group of people in any field of activity. Typical features of such processes are incompleteness of a prior data, uncertainty, mutual connectivity, difficulty of formation of the agreed targets and methods of their achievement. Incompleteness of a priori data results in the necessity to formulate these or those tasks of local character in a variety of essentially different settings, and their combining in a single system presents serious theoretical difficulties. The general scheme of the active process is presented in fig. 5.

Here $\lambda(t)$ is a variable which may be known to the researcher, but it is hardly measureable, i. e. its control takes place rather seldom and the procedure of measurement is long and expensive. The variable $\Theta(t)$ is responsible for the impact on an object of external environment. For organizational systems such impact can include any instructions, resolutions, orders, acts which undergo these or those changes eventually. $\omega^i(t)$, $i = \overline{1,k}$, are the process variables monitored along the object length which show additional information about the process. Θ_t, μ_t, u_t, ω^i_t, x_t, y_t, z_t are measurements of the appropriate variables which are carried out through different intervals of time.

At present two fundamental differences between organizational systems and technical ones are revealed. The first difference is the existence of back couplings, control circuits, etc., built in the researched process from outside. The second difference is characterized by monitoring aids or measurement of the appropriate variables, as one of elements of gauges of some input-output variables characterizing a process status is a person or a group of experts. The estimates of some variables are impossible without involvement of a person; therefore there will be a subjective factor in measurements. The control system of organizational processes is a hierarchical, multiple-loop system including a person as a necessary and major element; in this case the formation of a matrix of observations is of some difficulty as it includes variables of different types belonging to different scales. One more cornerstone in active systems control is ignorance about the process that leads to the mismatch between the assumptions of the researched object and the object itself. It happens because of a lack of a priori information, influence of arbitrary factors whose characteristics are not known to the researcher, imperfection of monitoring aids of variables, and not enough representativeness of sampling for measurements [10–13].

An object group which is widespread at thermal power plants will be considered as an example (fig. 6).

It should be noted that objects O_1, O_2, ..., O_N are boiler units, T_1, T_2, ..., T_L are turbines which can be in different statuses up to switch-off in production. It naturally significantly complicates the control task of such an interdependent complex. Similar systems are at a development stage at present time [14; 15].

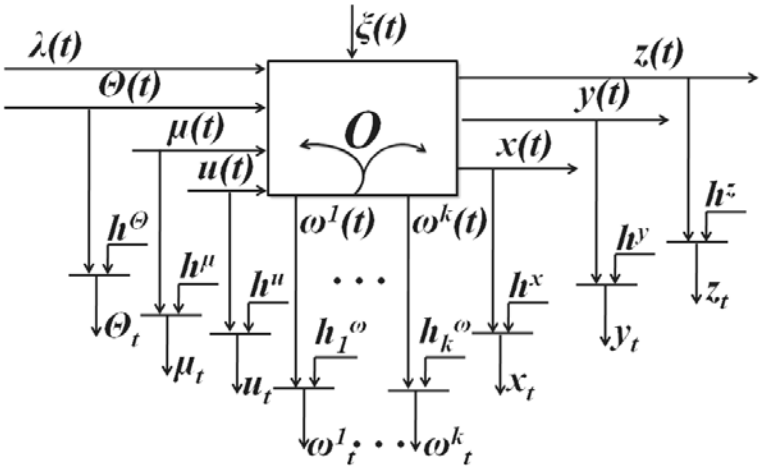


Fig. 5. The general scheme of a multivariate active process

Рис. 5. Общая схема многомерного активного процесса

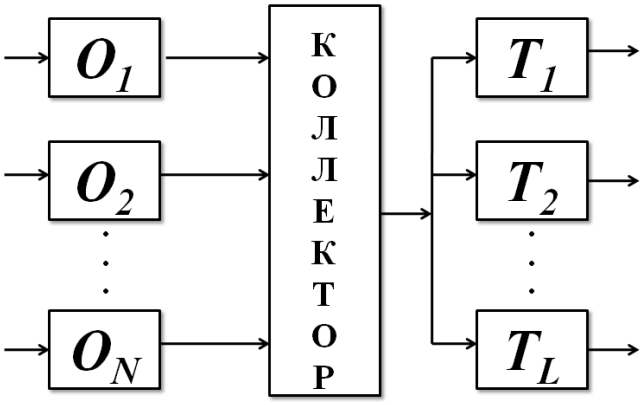


Рис. 6. The general scheme of a power unit of a thermal power plant.

Рис. 6. Общая схема энергоблока теплоэлектростанции

It seems reasonable to provide some data on mathematical simulation by concentrating metallurgical conversion NMMC which passed numerous tests and was implemented in production. The fragment of a similar technological chain is presented in fig. 4. In this case the initial variables were technological parameters of the ores extracted in the territory of the Norilsk industrial region (Oktyabrskii, Komsomolskii, Medvezhii ruchey and others) as well as the amount of furnace charge, sandstone, concentrate, waste, matte and others and contents of different elements in them. The similar system which was called "Metal" system was implemented at Norilsk MMC with considerable economic effect. K-, H-, T-models which are included in "Metal" represented a system of more than 330 ratios of parametric and non-parametric types [10].

Conclusion. The paper deals with the problem of identification and control of a group of serial, parallel and parallel-serial type of technological objects sequences. The special features of the relationships between objects and process variables in each case are defined. Algorithms of identification and control of a group of objects, as well as the decision-making algorithm are given in a general form. Examples of technological processes representing groups of local objects are described.

References

1. Tsypkin J. Z. *Osnovi informacionnoi teorii identificacii* [The basis of information identification theory]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p.

2. Medvedev A. V. [To the theory of nonparametric systems. Process]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 3 (29), P. 4–9 (In Russ.).

3. Medvedev A. V. [To the theory of nonparametric systems. Modeling]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4(30), P. 4–9 (In Russ.).

4. Korneeva A. A., Chzhan E. A. [About nonparametric simulation of stochastic objects]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 2 (48), P. 37–42 (In Russ.).

5. Korneeva A. A., Kornet M. E. Sergeev A. N., Chzhan E. A. [About the adaptive control of serial technological objects]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 1, P. 72–78 (In Russ.).

6. Medvedev A. V. [Some notes on H – models for non-inertis systems with a delay]. *Vestnik SibGAU*. 2014, Vol. 54, No. 5, P. 24–34 (In Russ.).

7. Mihov E. D. [Process control with "tubular" structure]. *Materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2014, P. 99–101 (In Russ.).

8. Chzhan E. A. [To the problem of H-processes modeling]. *Materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2014, P. 137–139 (In Russ.).

9. Bannikova A. V., Mihov E. D. [About the nonparametric control algorithm macroobject] *Young scientist*. 2014, Vol. 1. (60), P. 115–119 (In Russ.).

10. Medvedev A. V. *Osnovi teorii adaptivnyh sistem* [Bases of the theory of the adaptive system]. SibSAU, Krasnoyarsk, 2015, P. 526 (In Russ.).

11. Korneeva A. A., Tcepkova M. V., Chzhan E. A. [About computer simulation of organizational processes] *Impulse-2011* [Material VIII All-Russian Scientific and Practical Conf. "Impulse"]. Tomsk, 2011, P. 232–235 (In Russ.).

12. Medvedev A. V. Computer Modeling of Active Process. *Proc. of the Conf. Sc. in Modern Life.* Odessa, 2013, P. 50–75.

13. Medvedev A. V. [About a computer research of the active systems]. *Control problems in social systems*. 2013, Vol. 5, No. 8, P. 86–104 (In Russ.).

14. Koplyarova N., Chubarov A., Sergeeva N. About the Control of a Group of Objects on the Example of Steam Pressure in the CHP Main Line. *Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Methods in Cybernetics and System Analysis – AMSA'2017*. Krasnoyarsk, 18–22 September, 2017: Proceedings of the International Workshop. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017, P. 96–103.

15. Zhalnin D. A., Shorokhov V. A., Evdokimov A. N., Bubnovskii O. A., Churinov A. V. Experience with the introduction of a pressure regulator system in the main steam line at the Krasnoyarsk TÉTs-2 plant. *Power plant.* 2009, Vol. 11, P. 18–25 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984. 320 с.

2. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. № 3 (29). С. 4–9.

3. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. № 4(30). С. 4–9.

4. Корнеева А. А., Чжан Е. А. О непараметрическом моделировании стохастических объектов // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 37–42.

5. Об адаптивном управлении последовательных технологических объектов / А. А. Корнеева [и др.] // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 1. С. 72–78.

6. Медведев А. В. Некоторые замечания к *H*-моделям безынерционных процессов с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54). С. 24–34.

7. Михов Е. Д. Управление процессом, имеющим «трубчатую» структуру // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракетно.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск). В 3 ч. Ч. 2. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 99–101.

8. Чжан Е. А. К задаче моделирования *H*-процессов // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракетно.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск). В 3 ч. Ч. 2. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 137–139.

9. Банникова А. В., Михов Е. Д. О непараметрическом алгоритме управления макрообъектом // Молодой ученый. 2014. Вып. 1 (60). С. 115–119.

10. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 526 с.

11. Корнеева А. А., Цепкова М. В., Чжан Е. А. О компьютерном моделировании организационных процессов // Импульс-2011 : Тр. VIII Всерос. науч.-практ. конф. Томск, 2011. С. 232–235.

12. Medvedev A. V. Computer Modeling of Active Process // Proc. of the Conf. Sc. in Modern Life. Odessa, 2013. P. 50–75.

13. Медведев А. В. О компьютерном исследовании активных систем // Проблемы управления в соц. системах. 2013. Т. 5, вып. 8. С. 86–104.

14. Koplyarova N., Chubarov A., Sergeeva N. About the Control of a Group of Objects on the Example of Steam Pressure in the CHP Main Line // Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Methods in Cybernetics and System Analysis – AMSA'2017 (18–22 September, 2017, Krasnoyarsk) Proceedings of the International Workshop. Novosibirsk : NSTU publisher, 2017. Pp. 96–103.

15. Опыт внедрения системы регулирования давления в главной паровой магистрали на Красноярской ТЭЦ-2 / Д. А. Жалнин [и др.] // Электрические станции. М. : ЗАО «Научно-техническая фирма «Энергопрогресс», 2009. С. 18–25.

© Kornet M. E., Orlova A. S., 2017

UDC 519.87

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 754–763

ON NONPARAMETRIC IDENTIFICATION AND DUAL CONTROL OF QUASILINEAR DYNAMIC PROCESSES

A. V. Medvedev[1], A. V. Raskina[2*]

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[*]E-mail: raskina.1012@gmail.com

The problems of identification and control of stochastic objects with a discrete – continuous technological process nature under conditions of nonparametric indeterminacy are considered. This term means a situation when the process structure with the accuracy to within parameters remains unknown. A more general class of dynamical nonlinear processes, later of quasilinear processes, is investigated. The processes in this category are characterized by a low degree of nonlinearity, that is the superposition principle for this type of object is insolvent. Such processes often occur in various control loops for aerospace objects and systems. Nonparametric models where the dynamic process memory depth is specified on the basis of the selection of essential variables rule are given. According to this rule, the only variables included in the nonparametric model, at which the optimum blurring factor of the kernel is minimal. Nonparametric algorithms of quasilinear objects dual control are given. Control devices built on the basis of these algorithms not only perform the object control function directly, but also its study. The case when the control device corresponding to its inverse model "turns on" at the object input is considered. The process of dual control system training with active information accumulation is analyzed. The results of a numerical study of nonparametric models for quasilinear processes with memory are presented in detail, as well as the results of a computational experiment using the algorithm of nonparametric adaptive dual control. In the simulation, objects characteristics were described by equations with different degrees of nonlinearity, the form of which was unknown, and which, during active information accumulation, were automatically restituted on the basis of the input-output variables process measurement. Also, the influence of various noise levels affecting an object and in measurement channels was investigated. The given computational experiments confirmed the possibility of using nonparametric algorithms for identifying and controlling of quasilinear systems.

Keywords: nonparametric algorithms, nonlinear processes, blur coefficient of nuclear function, a priori information, dynamic system, dual control algorithm.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 754–763

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ КВАЗИЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

А. В. Медведев[1], А. В. Раскина[2*]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[*]E-mail: raskina.1012@gmail.com

Рассматриваются проблемы идентификации и управления стохастическими объектами с дискретно-непрерывным характером технологического процесса в условиях непараметрической неопределенности. Под этим термином понимается ситуация, когда структура процесса с точностью до параметров остается неизвестной. Исследуется более общий класс динамических нелинейных процессов, в дальнейшем – квазилинейных процессов. Процессы, входящие в эту категорию, характеризуются малой степенью нелинейности, т. е. принцип суперпозиции для данного типа объектов является несостоятельным. Подобные процессы часто имеют место в различных контурах управления аэрокосмическими объектами и системами. Приводятся непараметрические модели, в которых глубина памяти динамического процесса уточняется на основании правила выделения существенных переменных. Согласно этому правилу в непараметрическую модель включаются только те переменные, оптимальный коэффициент размытости ядра при которых минимален. Приводятся непараметрические алгоритмы дуального управления квазилинейными объектами. Управляющие устройства,

построенные на основании данных алгоритмов, выполняют функцию не только непосредственно управления объектом, но еще и его изучения. Рассматривается ситуация, когда на входе объекта «включается» управляющее устройство, соответствующее его обратной модели. Анализируется процесс обучения системы дуального управления с активным накоплением информации. Подробно приводятся результаты численного исследования непараметрических моделей для квазилинейных процессов с памятью, а также результаты вычислительного эксперимента применения алгоритма непараметрического адаптивного дуального управления. При моделировании характеристики объектов описывались уравнениями с различной степенью нелинейности, вид которых был неизвестен и которые в процессе активного накопления информации автоматически восстанавливались на основании измерения входных-выходных переменных процесса. Также исследовалось влияние различных помех, действующих на объект и в каналах измерения. Приведенные вычислительные эксперименты подтвердили возможность использования непараметрических алгоритмов для идентификации и управления квазилинейными системами.

Ключевые слова: непараметрические алгоритмы, нелинейные процессы, коэффициент размытости ядерной функции, априорная информация, динамическая система, алгоритм дуального управления.

Introduction. Traditionally nonlinear dynamic processes identification and control theories developed for particular classes of systems and models. In the first works on these problems the methods based on Voltaire number [1; 2] – the convolution linear integral, with its use it was possible to describe nonlinear systems, generally prevailed. It is necessary to consider that for early stages of identification for nonlinear systems methods development the noise was most often assumed by the additive white Gaussian noise [3] that was serious restriction for many relevant processes. Further other types of models were actively developed, especially important among them are block structure models, for example, a Wiener model and a Gammerstein's model [4; 5]. This type of models consists of static nonlinear and dynamic linear elements. Also, methods based on correlation and separable functions able to define which block and structural models would be suitable for system description were developed. The basic feature of the above listed research directions is that they include a stage of a model parametrical structure choice therefore these methods are applicable only for identification and control of rather well studied processes for which the studied process equation type is in some way or other defined, for example, in the form of differential or difference equations, transfer functions, a set of standard links of a dynamic system and others. It is necessary to consider that essential difficulties of identification and control of nonlinear objects problem solving are caused by object structure complexity and incompleteness of mathematical description and information about an object. In this case, if a priori information on the studied process is insufficient for the reasonable choice of parametrical structure, the use of nonparametric identification theory is expedient [6]. The nonparametric theory, unlike previous, assumes that only qualitative characteristics of system, such as, for example, linearity or nonlinearities, stability or instability and others are known. It means that the use of nonparametric theory allows to deviate, completely in many cases, from a question of an object parametrical structure determination.

Identification problem definition. Let us consider the following modeling scheme of one-dimensional nonlinear dynamic process (fig. 1).

In fig. 1 the designations are accepted: $x(t)$ – an output process variable, $u(t)$ – the control action, $x_s(t)$ – an object model output; (t) – the continuous time; the index t – discrete time; h_t^u, h_t^x – random noise of measurements of process corresponding variables; the index h at object variables for the simplicity reason is omitted: $u_t = u_t^h$, $x_t = x_t^h$; $\xi(t)$ – vector random noise.

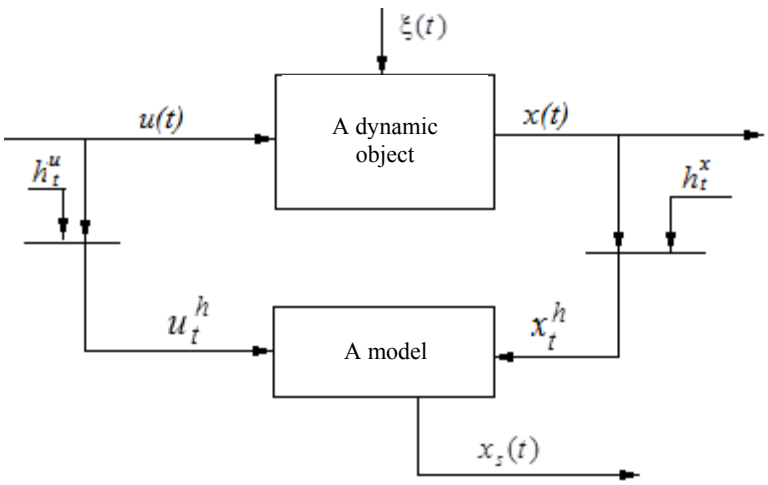


Fig. 1. A flowchart of quasilinear dynamic processes modeling

Рис. 1. Блок-схема моделирования квазилинейных динамических процессов

Let us enter the following designations:

$$z_t = \left(z_1,\ \ldots,\ z_{k+1}\right) = \left(x_{t-1}, \ldots, x_{t-k}, u_t\right), \qquad (1)$$

then

$$x_t = f\left(z_t\right). \qquad (2)$$

In the conditions of nonparametric indeterminacy the structure of nonlinear dynamic process model can be described by the equation in a discrete form:

$$x_t = f(x_{t-1}, x_{t-2},\ \ldots,\ x_{t-k}, u_t), \qquad (3)$$

where $f(.)$ is an unknown functional, k – "the depth" of a dynamic object memory (on A. A. Feldbaum's terminology) [7]. If we draw analogy to the studied process description in the continuous time in the form of differential equations, then k – an order of the senior derivative in the corresponding equation. It is essential here that the functional type is not defined to within parameters. With regard to redesignations the process model (3) can be shown on the following scheme (fig. 2) which illustrates the dynamic system model in a discrete time reduced to a static system model when not only variables u_t, but also $x_{t-1}, x_{t-2},\ \ldots,\ x_{t-k}$ and others are delivered to an entry of the last.

The considered process refers to a class of discrete-continuous, that is the process is continuous by nature, however, the process "input-output" variables are controlled through discrete time points Δt, forming an "input-output" variables $\left\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\right\}$ sample of observations, where s – is a sample size, the index h at object variables for the simplicity reason is omitted.

Nonparametric identification. As we said before, under conditions of nonparametric indeterminacy the description of an object to within parameters is unknown. In this case, a conditional mathematical expectation of a form can be accepted as an object model:

$$x_s(t) = M\{x(t) / u(t)\}. \qquad (4)$$

As the studied object model the following nonparametric estimation of regression function on observations $\left\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\right\}$ in a discrete form can be accepted [8]:

$$x_s = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} x_i \cdot H\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right)\prod_{j=1}^{k}\frac{1}{c_s^{x^j}} H\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s^{x^j}}\right), \qquad (5)$$

where $H(\cdot)$ – a nuclear bell-shaped function, a c_s^u, $c_s^{x^1}$, ..., $c_s^{x^k}$ – nuclear function blur coefficients which satisfy convergence conditions [8].

The only output variables x_{s-1}, ..., x_{s-k} are included in the model (5), which were defined with the use of dynamic process memory depth rule determination [9; 10]. The essence of this rule is as follows: if we put into correspondence a nuclear function blur coefficient $c_s^{*x^1}, c_s^{*x^2}$, $\ldots, c_s^{*x^k}$ for each output variable $x_{s-1}, \ldots, x_{s-k}$ of nonparametric estimation (5), which delays at some values, at which the difference between the obtained model and the actual object output will be minimum, then that variable with the smallest coefficient contributes a lot to generation of total estimation and thereby has a greater influence on an output variable. These particular variables have to be considered in model (5). It should be noted that the model (5) can be used only at equal intervals of measurement Δt.

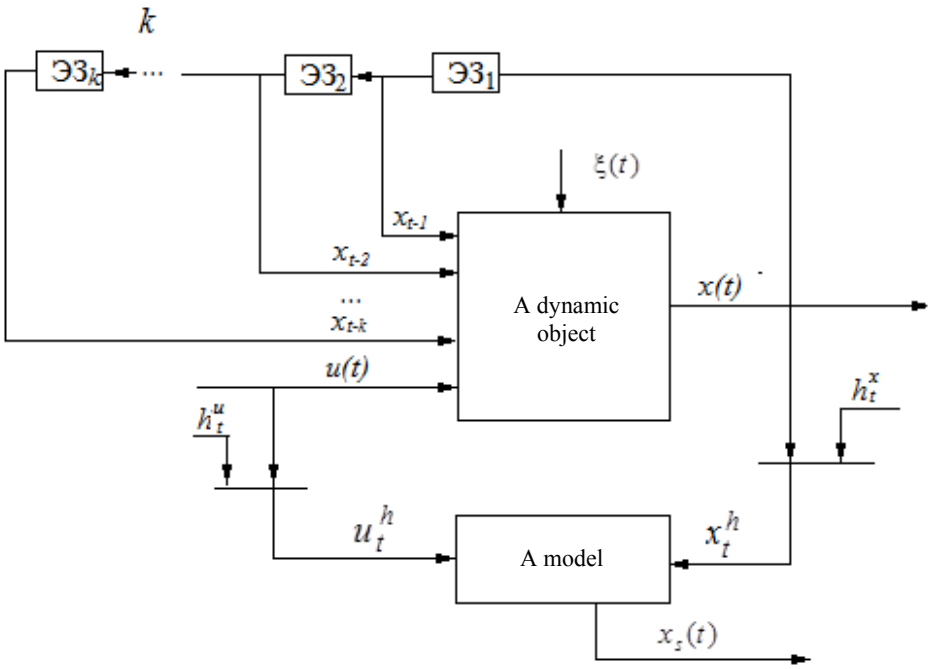


Fig. 2. A quasilinear dynamic process control flowchart

Рис. 2. Блок-схема управления квазилинейным динамическим процессом

Dual control algorithms. Dual control was opened by A. A. Feldbaum in 1960 and developed on the basis of the statistical decisions theory [7]. It should be noted that the studying control systems are systems "with memory", that means they are not only able to study characteristics of an object, but also, keeping them in memory, to develop rational control actions. The theory of dual management gained its further development in researches of various authors [11–14], in particular B. Vittenmarka [15]. Let us note that when we set a problem, most often the noise probability distribution and also an object parametrical model are assumed to be known. That is the developed regulation algorithms are applicable in conditions when the model structure of an object or a regulator is set to within parameters. In case when the dynamic process structure is not certain, one of possible solutions of a control task is the application of nonparametric adaptive control systems keeping dualism components.

Let us consider an idealized case at first. We enter an object operator A, which describes the process, that is $x(t) = A < u(t) >$, where $u(t)$ – a control action, $x(t)$ – an object output. If there is an operator, inverse to A, that is A^{-1}, $A^{-1}A = 1$ – a unity operator, then

$$A^{-1}x(t) = A^{-1}A < u(t) >, u(t) = A^{-1}x(t). \quad (6)$$

Assuming now $x(t) = x^*(t)$, where $x^*(t)$ – the setting trajectory, we find from (6) the ideal value $u(t) = u^*(t)$. Thus, the type of the ideal regulator ($\mathfrak{A}$-regulator) [6] can be presented in the form (6). The main problem is that in most cases operators A and A^{-1} are unknown, and, therefore, the given method of the $\mathfrak{A}$-regulator construction becomes very problematic. Therefore, there is a question of dual control scheme construction which is close to actual.

Under conditions of nonparametric indeterminacy the description of an object to within parameters, as it was already mentioned, is unknown. In this case, as direct operator A estimation the conditional expectation (4) can be accepted, and estimates of the inverse operator A^{-1}:

$$u^*(t) = M\{u(t) / x(t) = x^*(t)\}. \quad (7)$$

It is equivalent to "inclusion" of an "anti-object" to the entry of the operated object

If we accept expression (5) as a direct operator A estimation, then the inverse operator A^{-1} estimation will be (8):

$$u_s^* = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} u_i \cdot H\left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{k}\frac{1}{c_s^{x^j}}H\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s^{x^j}}\right). \quad (8)$$

The nonparametric dual control algorithm explicitly described in [6] is:

$$u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1}, \quad (9)$$

where u_s^* – an augend in charge of an object information accumulation, and $\Delta u_{s+1} = \varepsilon\left(x_{s+1}^* - x_s\right)$ – the "studying" search steps. Let us analyze the character of algorithm dualism (9). On the initial control step the main role belongs to the second addend Δu_{s+1} from formula (9). It is a case of active information accumulation in the system of dual control which begins with the first observation of input and output object variables emergence. In the process of training (information accumulation) when forming the operating action u_{s+1}, the first augend, that is u_s^* starts obtaining an escalating role. Thus, in the process of an object dual control both the stage of object studying, and the stage of its reduction to the purpose appear.

For control estimation the relative error was used:

$$W = R_s / D_s, \quad (10)$$

where $R_s = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\left(x_i - x_i^*\right)^2$, x_i – an output variable measured value, x_i^* – the setting action, D_s – estimation of the output variable x_t dispersion.

Computing experiment. Let us consider the linear case for a start. Let an object be described by the following simple equation:

$$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t. \quad (11)$$

In the described experiment the training sample is formed in the following way. Let a series of various input actions $u_1(t) - u_4(t)$ be described by the equations (12), their charts are in fig. 3.

$$\begin{aligned} u_1(t) &= 0.6 + 0.3 \cdot \sin(0.15 \cdot t); \\ u_2(t) &= 0.5 + 0.2 \cdot \cos(0.05 \cdot t); \\ u_3(t) &= 0.23 + 0.1 \cdot \sin(0.2 \cdot t); \\ u_4(t) &= 0.1 + 0.4 \cdot \sin(0.2 \cdot t); \\ u_5(t) &= 0.3 + 0.8 \cdot \sin(0.05 \cdot t). \end{aligned} \quad (12)$$

The received values form the common input variables $u(t)$ sample defined in the range of $u(t) \in [-0.5, 1.1]$. The values of the input variable $u(t)$ are substituted in the equation (12), thus we receive an input-output variables $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$ sample, where s – the training sample size. In this case $s = 500$.

For the offered identification algorithm operability check we will create a new sample of input actions $u_6(t) = 1 + 0.5 \cdot \sin(0.1 \cdot t)$. The identification algorithm is carried out according to the following scheme. We set initial value $k = 6$. Further we develop a model in pursuance of formula (5). The relative modeling error is $W_0 = 0.017$. Further we find optimum coefficients with the coordinate descent algorithm use. The found coefficients are equal to $c_4^* = 0.38$ – at u_t, $c_1^* = 0.231$ – at x_{t-1}, $c_2^* = 0.378$ – at x_{t-2}, $c_3^* = 0.456$ – at x_{t-3}, $c_5^* = 1.876$ – at x_{t-4}, $c_6^* = 1.999$ – at x_{t-5}, $c_7^* = 1.983$ – at x_{t-6}. After realization of all algorithm stages, variables x_{t-4}, x_{t-5}, x_{t-6} were excluded. Thus the developed dynamic object final structure is:

$$x_s = \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 x_{t-2} + \alpha_3 x_{t-3} + \beta u_t,$$

what corresponds to a difference object equation structure (11), and a nonparametric model is:

$$x_s = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} x_i \cdot H\left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u}\right) \cdot \frac{1}{c_s^{x^1}}\Phi\left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s^{x^1}}\right) \times$$

$$\times \frac{1}{c_s^{x^2}}H\left(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s^{x^2}}\right) \cdot \frac{1}{c_s^{x^3}}H\left(\frac{x_{s-3} - x_{i-3}}{c_s^{x^3}}\right). \quad (13)$$

The forecast of the output $x_6(t)$ variable with nonparametric model use (13) is shown in fig. 4.

The relative identification error for the first experiment is equal to $W = 0.12$, that means satisfactory quality of the model. Thus, it is possible to draw a conclusion that the nonparametric algorithm (5) can be applicable for the linear dynamic processes identification with the known depth of memory k. We enter power functions into the process input difference equation. Let the object equation be described as:

$$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1}^{1.1} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3}^{1.2} + 1.5u_t. \quad (14)$$

Let the process (14) be affected by the additive noise level $\xi(t) = 5$ %, distributed according to the normal law with a zero expectation and dispersions 1. To model a random value distributed according to the normal law the method of polar coordinates was used. The coefficient of k was found in the same way as earlier. The results of object identification (14) when delivering to the entry of input action $u_6(t)$ are shown in fig. 5.

The relative identification error for the second experiment is equal to $W = 0.19$, that also means satisfactory model quality, even at rather high level of the external noise affecting the process. From the analysis of fig. 5 and relative error values, it is possible to draw a conclusion that in spite of the fact that the process (14) does not refer to the linear processes class, the nonparametric algorithm (5) copes with an identification task, and, thus, it can be applicable also for identification of nonlinear dynamic processes at partial nonparametric indeterminacy.

Let us consider the possibility of nonparametric algorithms application to control different types of quasilinear dynamic objects. To begin with, in the first experiment we will consider the linear dynamic object which is described by the following simple equation:

$$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t. \quad (15)$$

The results of nonparametric object control (15) with the use of control law (9) are presented in fig. 6. In fig. 6 the case of active information accumulation is presented, that is the initial training sample before performing an experiment was absent.

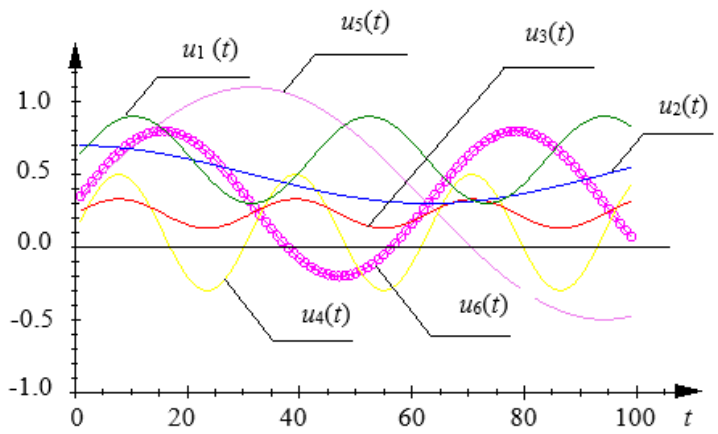


Fig. 3. Series of input actions $u_1(t) - u_4(t)$

Рис. 3. Серия входных воздействий $u_1(t) - u_4(t)$

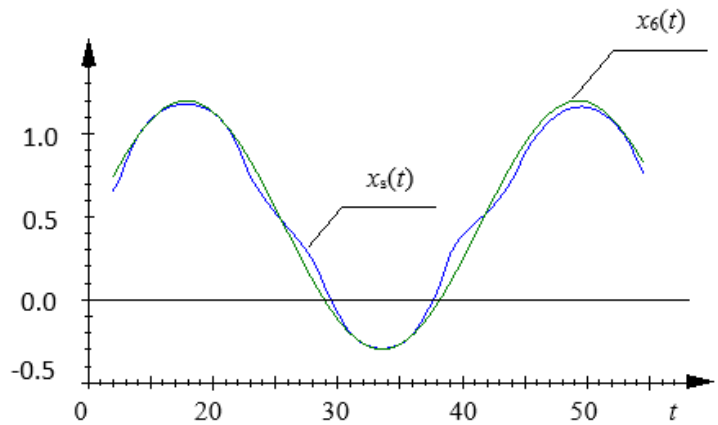


Fig. 4. Object output (11) $x_6(t)$ and nonparametric model output (13) $x_s(t)$, at an input variable $u_6(t)$ delivered to the entry

Рис. 4. Выход объекта (11) $x_6(t)$ и выход непараметрической модели (13) $x_s(t)$ при подаче на вход входной переменной $u_6(t)$

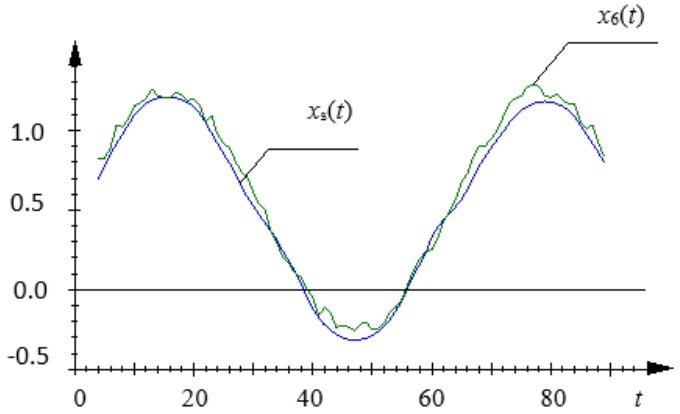


Fig. 5. Object output (14) and nonparametric model output $x_6(t)$ (14) $x_s(t)$, when delivering an input variable $u_6(t)$ to the entry, with the noise $\xi(t)$ = 5 %

Рис. 5. Выход объекта (14) $x_6(t)$ и выход непараметрической модели (14) $x_s(t)$ при подаче на вход входной переменной $u_6(t)$, при помехе $\xi(t)$ = 5 %

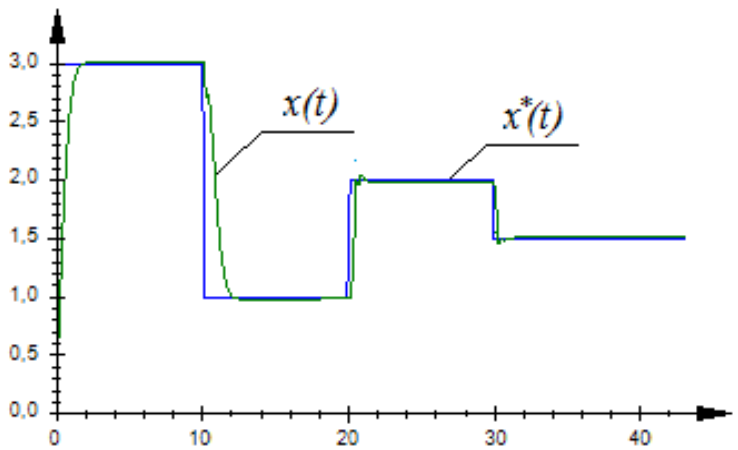


Fig. 6. Linear dynamic object control (15)

Рис. 6. Управление линейным динамическим объектом (15)

The relative control error for the first experiment is equal to W = 0,076, this suggests high quality of nonparametric control. In the analysis of figure 6 it is possible to observe how the dual control algorithm at active information accumulation behaves. On the initial steps of control, from the 1st to the 20th steps, the algorithm needs more time for reduction of an object to the control action as at this stage a sample training and accumulation take place. After the training level, starting from the 20th step, at the control action change an output object variable practically at once becomes equal to the task. We consider the possibility of nonparametric control algorithm application (9) for quasilinear dynamic systems. In the following experiments dynamic objects with different degree of nonlinearity will perform as the studied objects.

Let the dynamic object difference equation contain power functions, the object equation is described as follows:

$$x_t = 0,2 \cdot x_{t-1}^{1.2} - 0,3 \cdot x_{t-2} + 0,4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t. \quad (16)$$

The results of object control (16) at passive information accumulation, that is in case when there is a training sample with the size equal to s = 300, are presented in fig. 7.

The relative object control error (16) is equal to W = 0,085. We increase a sample size to s = 500 (fig. 8).

For the experiment presented in fig. 8 the relative control object error (16) is W = 0.045. We enter a $\xi = 5$ % noise level (the noise is added to an output variable measurement, distributed by normal distribution), the control results for this experiment are presented in fig. 9.

Thus, from the analysis of fig. 7–9 and values of the relative control errors, it is possible to draw a conclusion that the nonparametric control algorithm (9) successfully copes with the task of quasilinear dynamic systems regulation in case of passive information accumulation, even at external noise influence on the object under study, at the same time the quality of control practically does not differ from the linear object control at active information accumulation.

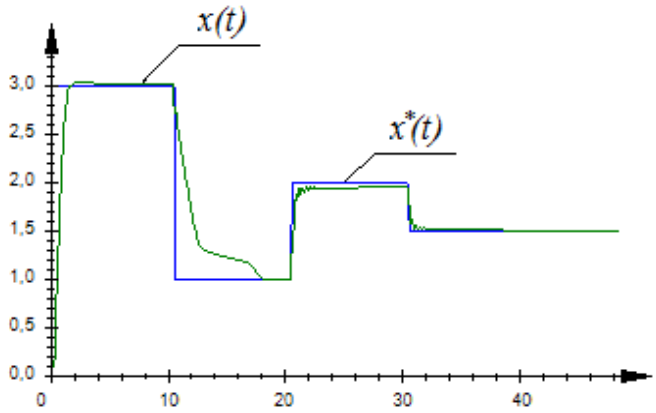


Fig. 7. Dynamic object control (16) at a sample size $s = 300$

Рис. 7. Управление динамическим объектом (16) при объеме выборки $s = 300$

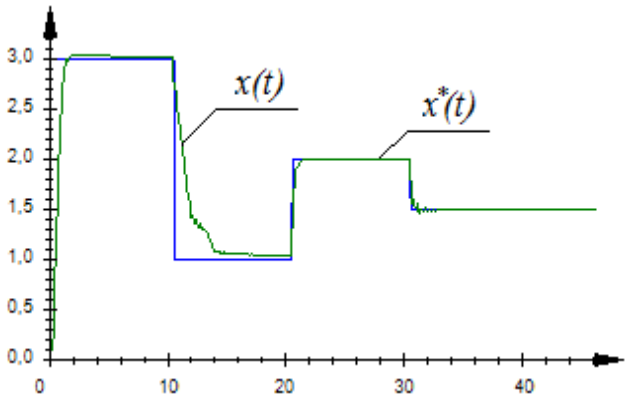


Fig. 8. Quasilinear dynamic object control (16) at a sample size $s = 500$

Рис. 8. Управление квазилинейным динамическим объектом (16) при объеме выборки $s = 500$

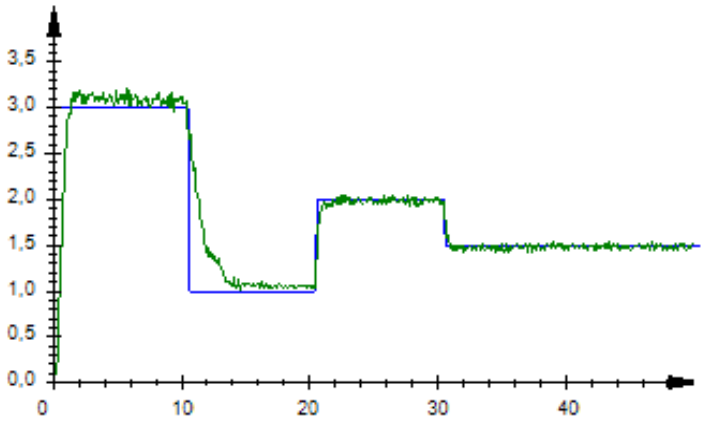


Fig. 9. Quasilinear dynamic object control (16) at a sample size $s = 300$, $\xi = 5\ \%$ noise level

Рис. 9. Управление квазилинейным динамическим объектом (16) при объеме выборки $s = 300$, помеха $\xi = 5\ \%$

We consider the dependence of the relative control error W on a power function index p (fig. 10). A variable function index will change x_{t-3}: $x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3}^p + 1.5u_t$.

Fig. 10 shows that if a power function index is less than 1.5, a relative control error is sufficiently low. On the contrary, at power function index increase more than 1.6, the sharp increase of the relative control error is observed. Information on dependence of the relative modeling error on the studied function type is provided in table.

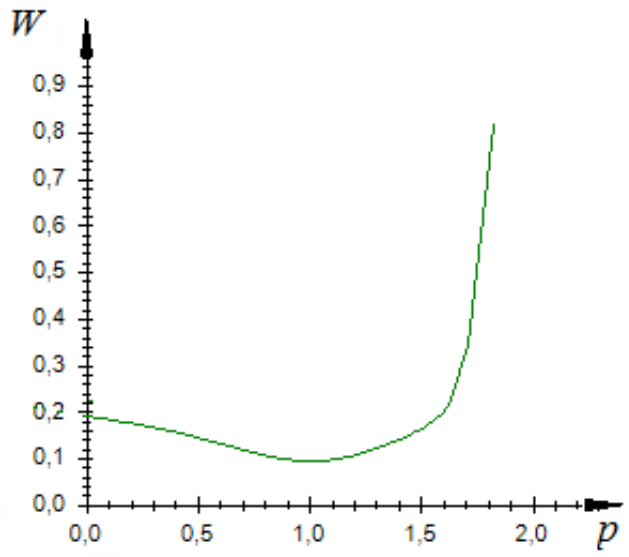


Fig. 10. Dependence between the relative regulation error on a power function index

Рис. 10. Зависимость между относительной ошибкой регулирования и показателем степенной функции

Dependence of the relative control error on an object equation type

Type of the equation	The relative control error
I. The linear equation: $x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.076
II. Non-linear equations (algebraic) $x_t = 0.2 \cdot x_{t-1}^{1.2} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.085
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2}^{1.2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.088
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3}^{1.2} + 1.5u_t$	0.113
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1}^{1.2} - 0.3 \cdot x_{t-2}^{1.2} + 0.4 \cdot x_{t-3}^{1.2} + 1.5u_t$	0.124
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1}^{1.5} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.115
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1}^{2} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.66
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2}^{2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.78
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot \sqrt{x_{t-3}} + 1.5u_t$	0.082
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1}^{1.5} - 0.3 \cdot \sqrt{x_{t-2}} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.23
$x_t = 0.2 \cdot \frac{1}{x_{t-1}} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.456
III. Non-linear equations (transcendental) $x_t = 0.2 \cdot \sin(x_{t-1}) - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.105
$x_t = 0.2 \cdot x_{t-1} - 0.3 \cdot \log_{10}(x_{t-2}) + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.128
$x_t = 0.2 \cdot e^{x_{t-1}} - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot x_{t-3} + 1.5u_t$	0.89
$x_t = 0.2 \cdot \cos(x_{t-1}) - 0.3 \cdot x_{t-2} + 0.4 \cdot \sin(x_{t-3}) + 1.5u_t$	0.117

From the table analysis it is possible to draw the following conclusions: if the dynamic object difference equation contains degrees up to the second order, the control algorithm (9) successfully copes with the control task. The relative control error increases if the power function is entered for the variable at which the coefficient has a greater influence on an output value. At increase in degree the quality of control considerably worsens. If the degree

at some variable is equal to 2 or more in a difference equation, then a nonlinear dynamic object control with a control algorithm (9) use is impossible.

If an object difference equation contains fractional degrees, the control algorithm (9) also copes with the control task. The results of this computing experiment show that even at each variable involution, the control algorithm (9) copes with the task of an object reduction to the setting action. It is also possible to notice that if a dynamic object difference equation contains trigonometric or logarithmic functions, then a control algorithm application (9) is possible. The considerable deterioration of control is observed in the presence of exponential function in the object equation. At the negative degrees the control quality considerably decreases.

Conclusion. The following important conclusion can be considered as the result of the present article. Nonparametric algorithms, as it was previously known, can be efficiently applicable for identification problem solving and also are rather qualitatively able to conduct the operated process of the linear class or category. It was naturally interesting, what if the process is nonlinear, in a varying degree. The computing experiments given above showed that identification and control algorithms can be also used for nonlinear dynamic objects control or objects for which the principle of superposition is not performed any more. Thus, the main conclusion which we can make is that the class of dynamic discrete continuous processes slightly extends for the nonparametric identification and control theory of the linear dynamic processes.

References

1. Pavlenko V. D. [Identification of nonlinear dynamical systems in the form of Volterra kernels based on impulse response measurements]. *Elektronnoye modelirovaniye*. 2010, Vol. 32, No. 3, P. 3–18 (In Russ.).
2. Gel'dner K., Kubik S. *Nelineynyye sistemy upravleniya* [Nonlinear control systems]. Moscow, Mir Publ., 1987, 368 p.
3. Andriyevskiy B. R., Matveyev A. S., Fradkov A. L. [Management and evaluation under information constraints: to a unified management theory, computing and communication]. *Avtomat. i telemekh.* 2010, No. 4, P. 34–99 (In Russ.).
4. Koplyarova N. V., Medvedev A. V. [Nonparametric control algorithms for systems of the Hammerstein class]. *Vestnik SibGAU.* 2015, Vol. 16, No. 1, P. 62–73 (In Russ.).
5. Koplyarova N. V., [Nonparametric identification of stochastic objects of the Wiener class]. *Sistemy avtomatizatsii v obrazovanii, nauke i proizvodstve: Trudy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2013, P. 445–451 (In Russ.).
6. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnyh system* [Basic theory of adaptive systems]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 525 p.
7. Fel'dbaum A. A. *Osnovy teorii optimal'nyh avtomaticheskih system* [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.
8. Nadaraja Je. A. *Neparametricheskie ocenki plotnosti verojatnosti i krivoy regressii* [Nonparametric estimation of probability density and the regression curve]. Tbilisi, Tbil. un-t Pabl., 1983, 194 p.
9. Raskina A. V. [Determination of the structure of a linear dynamic object in nonparametric identification problems]. *Vestnik SibGAU.* 2016, Vol.17, No. 4, P. 891–898 (In Russ.).
10. Medvedev A. V. [Adaptation and learning in a non-parametric uncertainty]. *Basic Research) (fiziko-matematicheskie i tehnicheskie nauki).* Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, P. 92–97.
11. Wenk C. J. Bar-Shalom Y. A multiple model adaptive dual control algorithm for stochastic systems with unknown parameters. *Automatic Control, IEEE Transactions.* 2003, Vol. 25, Iss. 4, P. 703–710.
12. Duan Lia, Fucai Qianb, Peilin Fuc. Optimal nominal dual control for discrete-time linear-quadratic Gaussian problems with unknown parameters. *Automatica.* 2008, Vol. 44, Iss. 1, P. 119–127.
13. Tse E., Bar-Shalom Y. An actively adaptive control for linear systems with random parameters via the dual control approach. *Automatic Control, IEEE Transactions.* 2003, Vol. 18, Iss. 2, P. 109–117.
14. Filatov N. M., Keuchel U., Unbehauen H. Dual control for an unstable mechanical plant. *Control Systems, IEEE.* 1996, Vol. 16, Iss. 4, P. 31–37.
15. Wittenmark B. Adaptive dual control methods: An overview. *In 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing.* Budapest, Hungary [Survey article], 1995, P. 67–72.

Библиографические ссылки

1. Павленко В. Д. Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерра на основе данных измерений импульсных откликов // Электронное моделирование. 2010. Т. 32, № 3. С. 3–18.
2. Гельднер К., Кубик С. Нелинейные системы управления : пер. с нем. М. : Мир, 1987. 368 с.
3. Андриевский Б. Р., Матвеев А. С., Фрадков А. Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи // Автоматика и телемеханика. 2010. № 4. С. 34–99.
4. Коплярова Н. В., Медведев А. В. Непараметрические алгоритмы управления системами класса Гаммерштейна // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 1. С. 62–73.
5. Коплярова Н. В. О непараметрической идентификации стохастических объектов класса Винера // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : Тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. С. М. Кулакова, Л. П. Мышляева ; Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2013. С. 445–451.
6. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем / СибГАУ. Красноярск. 2015. 525 с.
7. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.
8. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд. Тбил. ун-та, 1983. 194 с.

9. Раскина А. В. Определение структуры линейного динамического объекта в задачах непараметрической идентификации // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 891–898.

10. Медведев А. В. Адаптация и обучение в условиях непараметрической неопределенности // Фундаментальные исследования (физико-математические и технические науки). Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 92–97.

11. Wenk C. J., Bar-Shalom Y. A multiple model adaptive dual control algorithm for stochastic systems with unknown parameters // Automatic Control: IEEE Transactions on. 2003. Vol. 25, iss. 4. Pp. 703–710.

12. Duan Lia, Fucai Qianb, Peilin Fuc. Optimal nominal dual control for discrete-time linear-quadratic Gaussian problems with unknown parameters // Automatica. 2008. Vol. 44, iss. 1. Pp. 119–127

13. Tse E., Bar-Shalom Y. An actively adaptive control for linear systems with random parameters via the dual control approach // Automatic Control: IEEE Transactions on. 2003. Vol. 18, iss. 2. Pp. 109–117.

14. Filatov N. M., Keuchel U., Unbehauen H. Dual control for an unstable mechanical plant // Control Systems: IEEE. 1996, Vol. 16, iss. 4. P. 31–37.

15. Wittenmark B. Adaptive dual control methods: An overview // 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing. 1995. Pp. 67–72.

© Medvedev A. V., Raskina A. V., 2017

UDC 519.87

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 764–772

USING GENETIC PROGRAMMING TECHNIQUES FOR INERTIA-FREE SYSTEM IDENTIFICATION TASKS

E. D. Mihov

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: edmihov@mail.ru

The problem of identification of inertia-free objects is being investigated. The overall pattern of the process investigated is being described. As a research object, a stochastic inertia-free process of modeling has been chosen. A feature of the process under consideration is the fact that unmanaged but controlled variables influence the process under investigation. In addition, the process under investigation is affected by unmanaged and uncontrolled variables.

The levels of priori information has been briefly considered and characterized. For each level of priori information the identification method has been described. Particular attention is paid to the levels of priori information under which the identification task in a "broad" sense needs to be addressed.

As a method of identification, genetic programming is considered. Method of genetic programming has been chosen as a research object since this method is more commonly used in the identification problem. Despite the frequency with which this method is used, it is interesting to look at the results of this method under different conditions. As changing conditions, the object's complexity and the change in the volume of the training sample were used.

For the identification process, objects with different structures were selected. The dependence of the time of finding the structure of the object on the size of the training sample was investigated. As shown by studies, there is no clear correlation between the time of finding the structure of the object and the size of the training sample.

In addition, relationship between the time of the structure and the "complexity" of the object was investigated. As a criterion of "complexity" of the object, the number of input variables was taken. The study showed correlation between some values; with the increase in the number of input variables, the time of finding the structure of the process also increased.

Keywords: inertia-free object, genetic programming, identification.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 764–772

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ СИСТЕМ

Е. Д. Михов

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: edmihov@mail.ru

Исследуется проблема идентификации безынерционных объектов. Описана общая схема исследуемого процесса. В качестве объекта исследования был взят процесс моделирования стохастическим безынерционным процессом. Особенностью рассматриваемого процесса является тот факт, что на исследуемый процесс имеют влияние неуправляемые, но контролируемые переменные. Также на исследуемый процесс влияют неуправляемые и неконтролируемые переменные.

Кратко были рассмотрены и охарактеризованы уровни априорной информации. Для каждого уровня априорной информации описан способ идентификации. Особое внимание уделено уровням априорной информации, при которых необходимо решать задачу идентификации в широком смысле.

В качестве метода идентификации рассмотрено генетическое программирование. Метод генетического программирования был выбран в качестве объекта исследования по причине того, что данный метод все чаще используется в задаче идентификации. Несмотря на частоту использования данного метода, интересно посмотреть на результаты работы данного метода в различных условиях. В качестве меняющихся условий было усложнение объекта и изменение объема обучающей выборки.

Для процесса идентификации подбирались объекты с различной структурой. Исследовалась зависимость времени нахождения структуры объекта от размера обучающей выборки. Как показали исследования, явной зависимости между временем нахождения структуры объекта и размером обучающей выборки не наблюдается.

Помимо этого, была исследована зависимость между временем нахождения структуры от сложности объекта. В качестве критерия сложности объекта было взято количество входных переменных. Исследование показало, что между данными величинами есть связь: при увеличении количества входных переменных увеличивалось и время нахождения структуры исследуемого процесса.

Ключевые слова: безынерционный объект, генетическое программирование, идентификация.

Introduction. The identification of many stochastic objects is often limited to the identification of static systems. The most common pattern of the discrete-continuous process is shown in fig. 1 [1–4].

A is unknown object's operator, $\overrightarrow{x(t)}$ is the vector of the object's output variables; $\overrightarrow{u(t)}$ is the vector of the object's input variables; $\overrightarrow{\mu(t)}$ is the vector of the object's controlled but unmeasurable input variables; $\overrightarrow{\lambda(t)}$ is the vector of the object's and controlled but unmeasurable input variables; $\xi(t)$ is the random action, $\omega^i(t): i = 1, 2, ..., k$ are the variables in the process; (t) is the continuous time; H^{μ}, H^{u}, H^{x}, H^{z}, H^{q}, H^{ω} measuring devices; μ_t, u_t, x_t, ω_t are measures of $\mu(t)$, $u(t)$, $x(t)$, $\omega(t)$; $h^{\mu}(t)$, $h^{u}(t)$, $h^{x}(t)$, $h^{\omega}(t)$ are the random effects.

Levels of a priori information. Let's consider the different levels of priori information [5–7]:

1. Systems with parametric uncertainty. Parametric level of priori information assumes that there is a parametric structure with unknown parameters. Iterative probabilistic procedures are used for parameter estimation. The problem of identification in the narrow sense is solved in this case;

2. Systems with nonparametric uncertainty. A nonparametric level of priori information does not have the parametric structure, but it has some qualitative information about the process. For example it has uniqueness, or ambiguity of its characteristics, linearity for dynamic processes or the nature of its nonlinearity. Nonparametric statistics methods are used to solve problems of identification at this level (it is identification in a "broad" sense);

3. Systems with parametric and nonparametric uncertainty. System that does not correspond to any types described above is very important from the practical point of view. For example, for individual characteristics of a multiply connected process, on the basis of physicochemical laws, energy laws, the law of mass conservation, balance relationships, parametric patterns can be derived. However, for others it is not possible.

Thus, we are in a situation where the task of identification is formulated in terms of both parametric and nonparametric priori information. Then the models are an interconnected system of parametric and non-parametric ratios.

Genetic programming. Genetic programming algorithm is based on the same optimization algorithm [8–13].

This algorithm is applied when parametric structure of process is not known, but there is a sample where $(\vec{u}_i, x_i), i = \overline{1...n}$, $\vec{u}_i$ is the vector of the object's input variables, x_i is the object's output variables, n is number of sample units.

Genetic programming reconstructs parametric structure, describing the process based on the available sample.

Since genetic programming is based on the optimization method (genetic algorithm), the process of finding the most optimal structure is iterative. The criterions of optimality are mean error, mean-square error, mean relative error and other characteristics that reflect structure accurateness.

The process of genetic programming is divided into the following stages [14; 15]:

1) the first genetic trees are created randomly;

2) receiving descendants from trees, obtaining descendants, can be performed using the following actions:

– Replication;

– Reproduction;

– Mutation;

3) the trees that least satisfy the conditions of the optimum are destroyed;

4) verification of compliance with the conditions.

It is noticeable that the genetic programming process is very similar to genetic algorithms.

Let's describe central concepts of the genetic programming:

The concept of "genetic tree" is used as a description of the structure of an object in genetic programming. A genetic tree is a connected graph, where nodes represent actions, and finite elements (leaves) are variables (fig. 2).

We suggest the genetic tree of the following expression, as an example:

$$f(x_1, x_2) = x_1*(x_2 - 7) * (2/\sin(x_1)).$$

The restoration of the structure from the represented tree begins with the leaves.

It is also important to describe the terms replication, reproduction and mutation.

Replication is the action towards the tree that results in an exact copy of the parent tree (fig. 3).

Reproduction is receiving descendants by replacing the branches of parent trees with each other (fig. 4).

Mutation is receiving a descendant by changing the parent tree branch to randomly created one (fig. 5).

The last step in genetic programming is verification of result.

If the verification confirms to the conditions, then the researcher uses the resulting tree for object modeling.

If the conditions have not been achieved, the genetic programming process is repeated, beginning with step 2.

Computational experiment. Object modeling process is demonstrated in different conditions. In the process of computational experiments, the relationship between the dimension of the process under investigation and the speed of finding the parametric structure using genetic programming will be demonstrated.

For genetic programming, the following settings have been introduced:

– the number of trees = 10;

– prediction: average forecast error < 0.1;

– the maximum recovery time = 240 second.

The maximum time given for recovery is necessary to accelerate the experiment.

The structure will be restored for the following functions: $f(x) = x_1 + x_2 + 5$, $x_1 \in \left(\overline{0,3}\right)$, $x_2 \in \left(\overline{0,3}\right)$. We will check the dependence of the time of finding the structure from the value of the training sample for this example.

The dependence of the time of finding the structure from the value of the training sample example is not observed (fig. 6). This can be explained by the fact that this algorithm more depends on "successfulness" of the original tree choice.

It is worth mentioning that during experiments the genetic algorithm was completely restored, resulting in: $f(x) = (x_2 + 5) + x_1$, where the restored structure does not copy the original, for example: $f(x) = x_1 + x_1 + \cos(x_1) + x_2 + 3 + \sin(x_2)$, however, when $x_1 \in \left(\overline{0,3}\right)$, $x_2 \in \left(\overline{0,3}\right)$, structure is close to the original.

The structure will be restored for the following functions: $f(x) = \sin(x_1)*x_1 + 6*\cos(x_2)$, $x_1 \in \left(\overline{0,3}\right)$, $x_2 \in \left(\overline{0,3}\right)$. We will check the dependence of the time of finding the structure on the value of the training sample for this example.

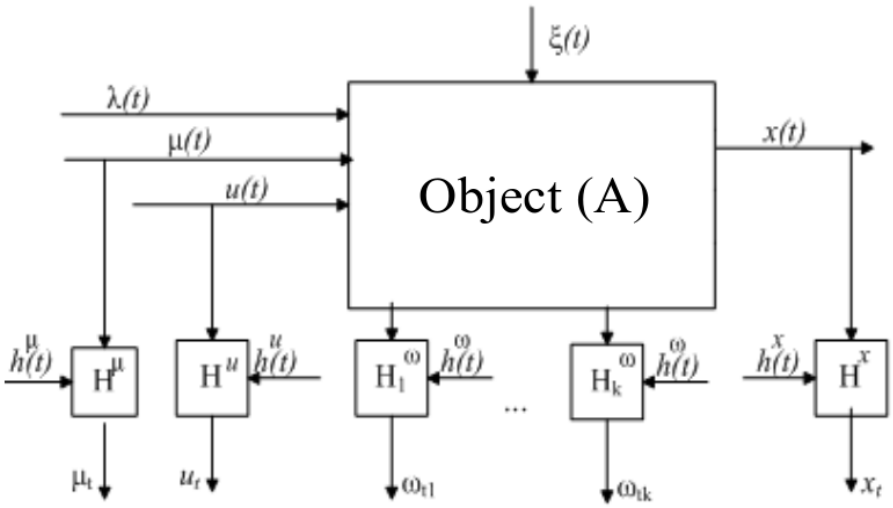


Fig. 1. Common pattern of the discrete-continuous process

Рис. 1. Общая схема исследуемого процесса

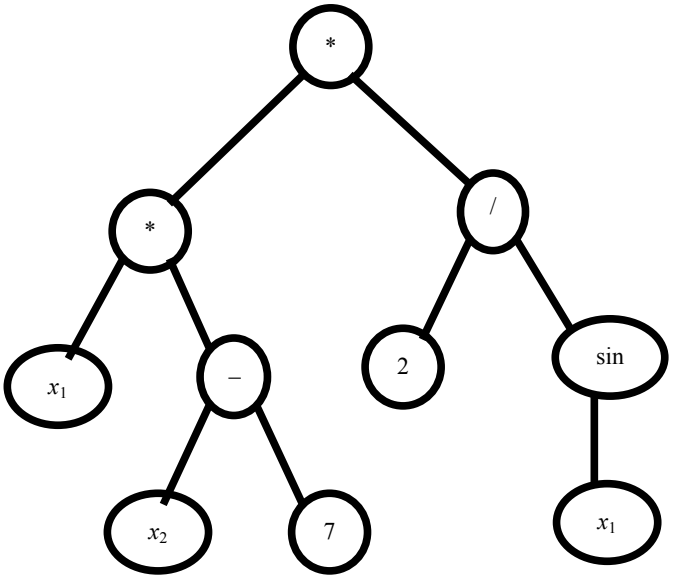
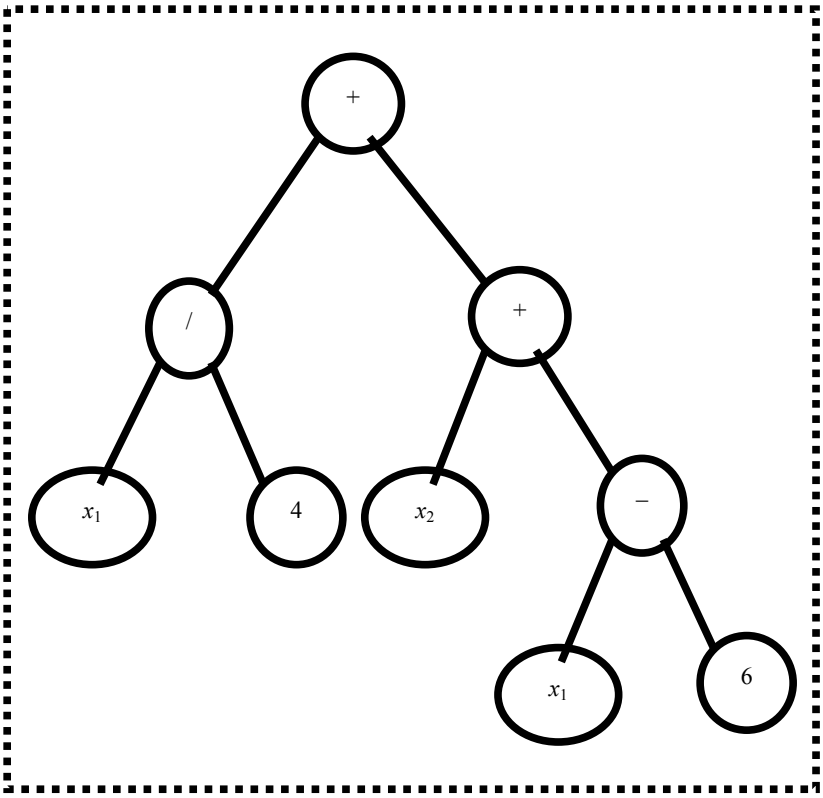
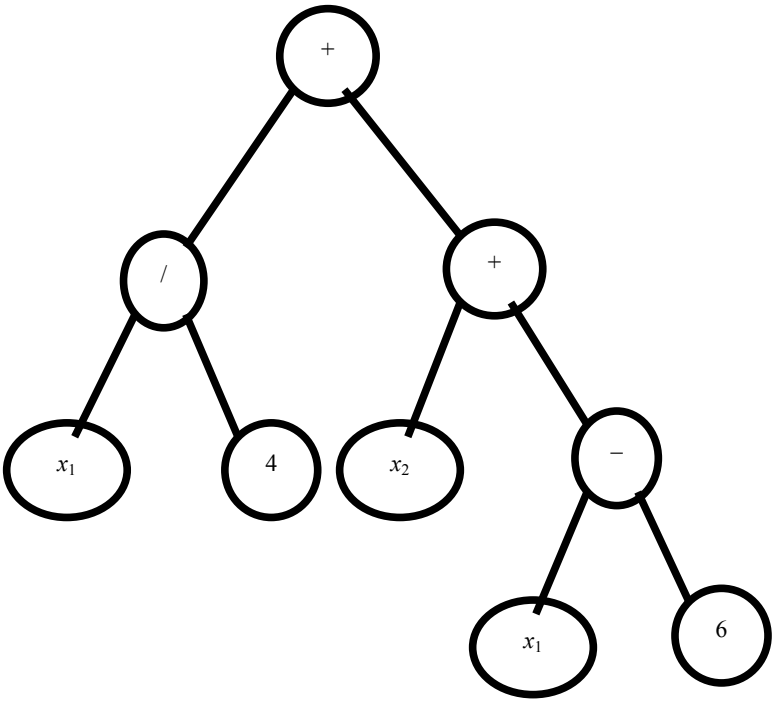


Fig. 2. Genetic tree example

Рис. 2. Пример генетического дерева



Generation t



Generation $t + 1$

Fig. 3. Replication's example

Рис. 3. Пример репликации

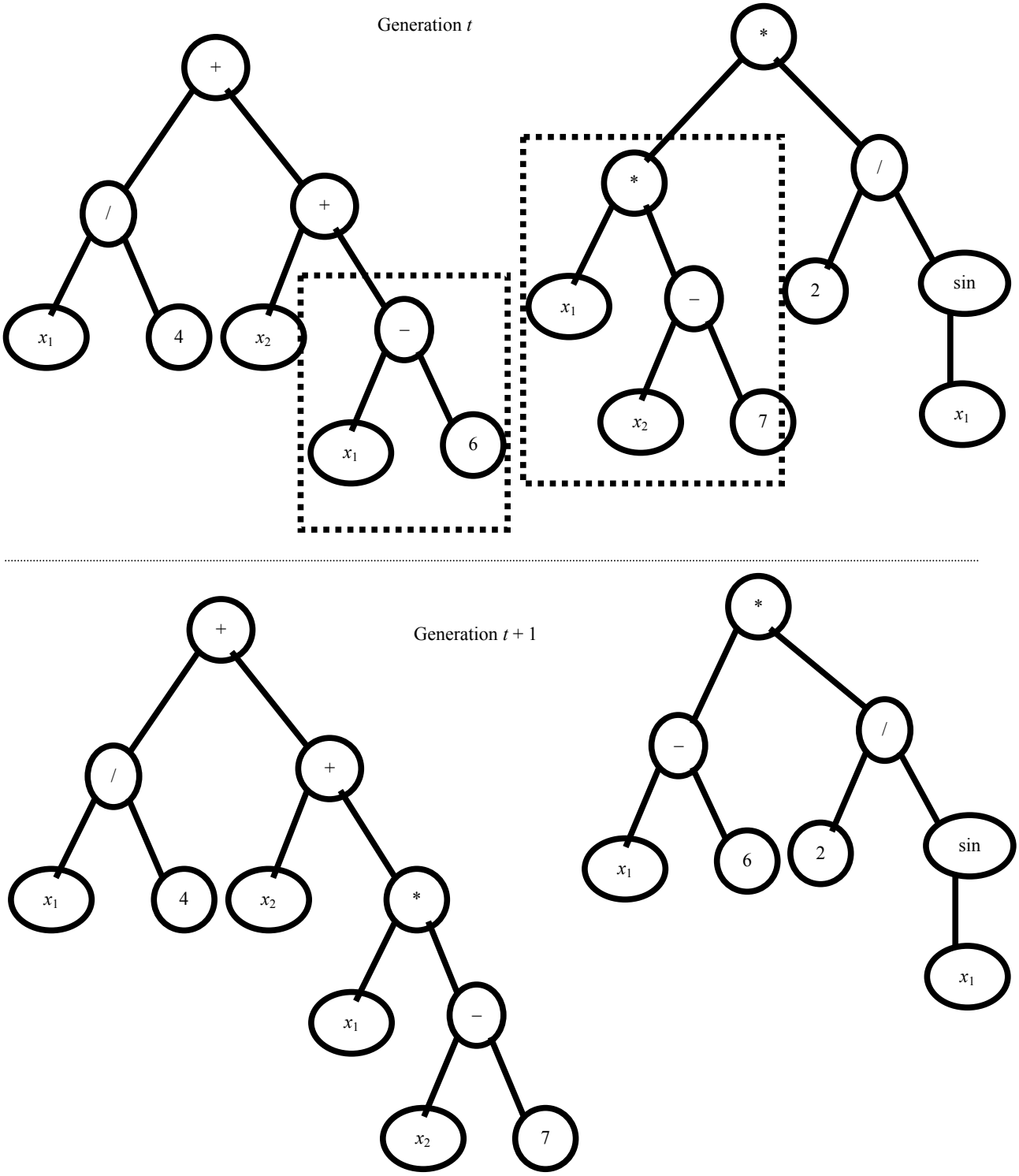


Fig. 4. Reproduction's example

Рис. 4. Пример размножения

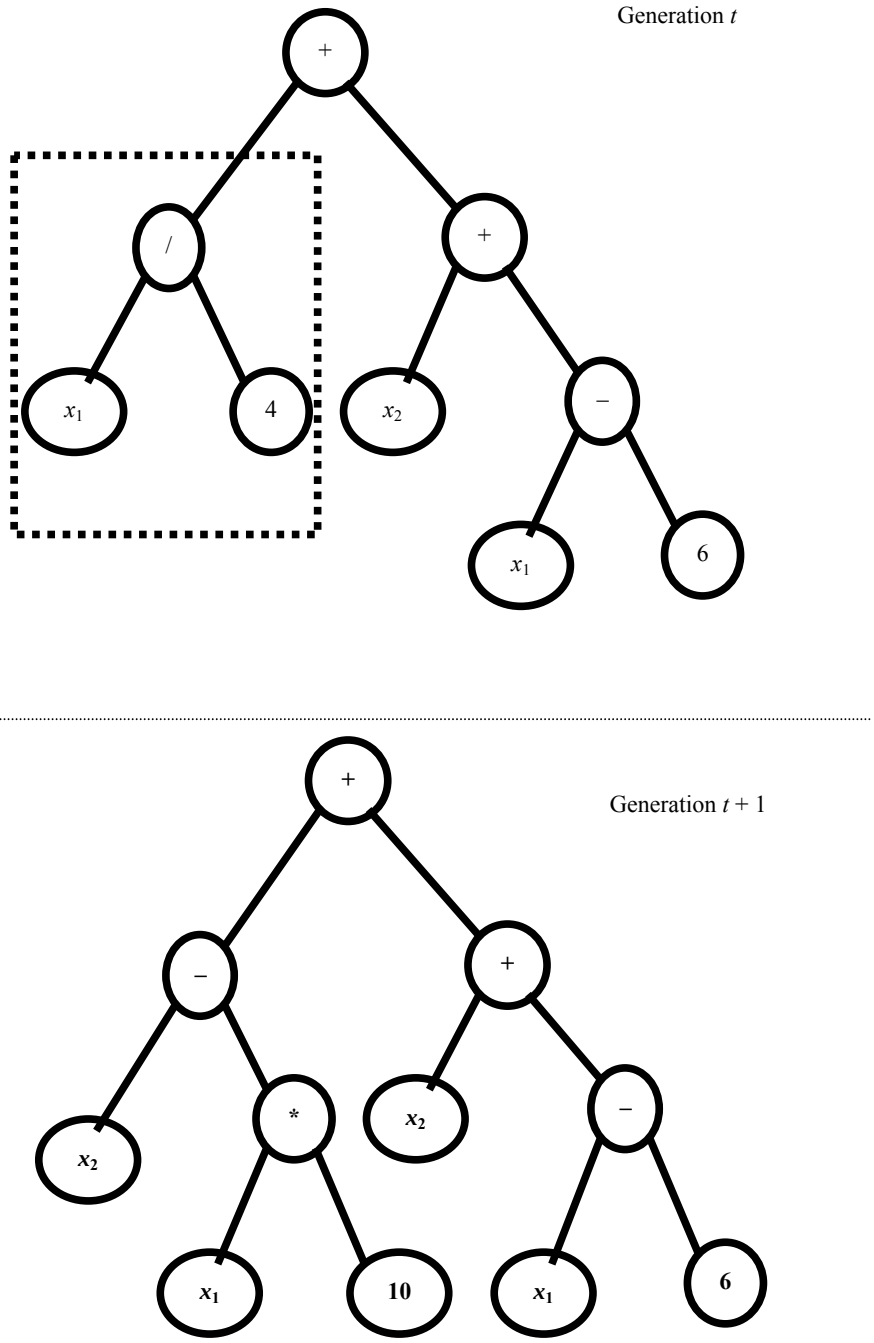


Fig. 5. Mutation's example

Рис. 5. Пример мутации

The dependence of the time of finding the structure on the value of the training sample example is not observed either (fig. 7).

The genetic algorithm restore the function: $f(x) = \cos(x_2) + \cos(x_2) + \cos(x_2) + \cos(x_2) + \cos(x_2) + \cos(x_2) + (x_1 * \sin(x_1))$, but the restored structure does not copy the original, for example: $f(x) = ((3*x_1)/4) + \cos(x_2)*6$, but, when $x_1 \in \left(\overline{0,3}\right)$, $x_2 \in \left(\overline{0,3}\right)$, this structure is close to the original.

When comparing fig. 6 and fig. 7, we can see that the average time to restore the structure is greater in example 2. It's the reason to suppose that the time of modeling depends on the "complexity" of the modeling object. Then more units (nodes and leaves) the genetic tree requires to restore the parametric form of the original function, the more "complicated" this function is. The value of input parameters also has dependence on the "complexity".

In the next experiment, we restore the function with 5 input variables: $f(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5$, $x_1 \in \left(\overline{0,3}\right)$, $x_2 \in \left(\overline{0,3}\right)$. Let's check the dependence of the modeling time on the value of the training sample.

As can be seen from fig. 8, there is no dependence of the time of finding the structure on the size of the training sample.

The genetic algorithm restores the function: $f(x) = (x_5 + x_3) + (x_1 + (x_4 + x_2))$, but the restored structure does not copy the original, for example: $(x_3 + (5 + (((x_5/4) * x_3) + ((x_1/(5 - x_2)) * (x_4 - \sin(x_1 + x_5))))))$, but, when $x_1 \in \left(\overline{0,3}\right)$, $x_2 \in \left(\overline{0,3}\right)$, this structure is close to the original.

The modeling time depends on the "complexity" of the modeling function shown in the fig. 9. You can see that in some cases the modeling process is fast. This happens in those cases when the algorithm choses the close to the desired function original tree.

As we can see in fig. 9, there is strong correlation between the modeling's time and the value of input variables.

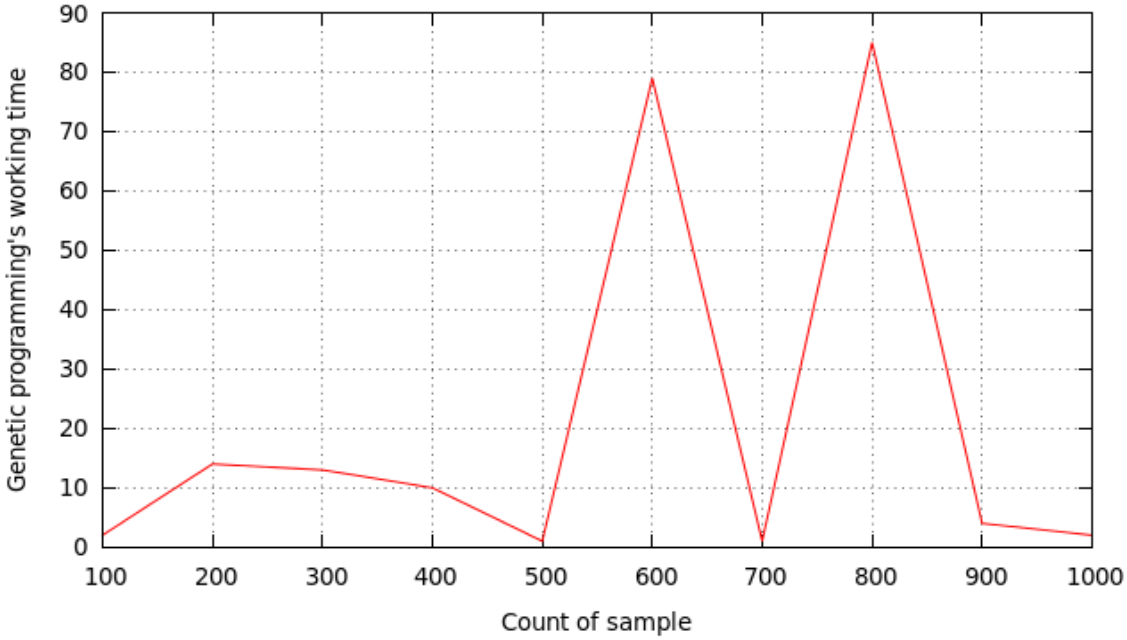


Fig. 6. Dependence of the time of finding the structure from the value of the training sample, example 1

Рис. 6. Зависимость времени нахождения структуры от величины обучающей выборки, пример 1

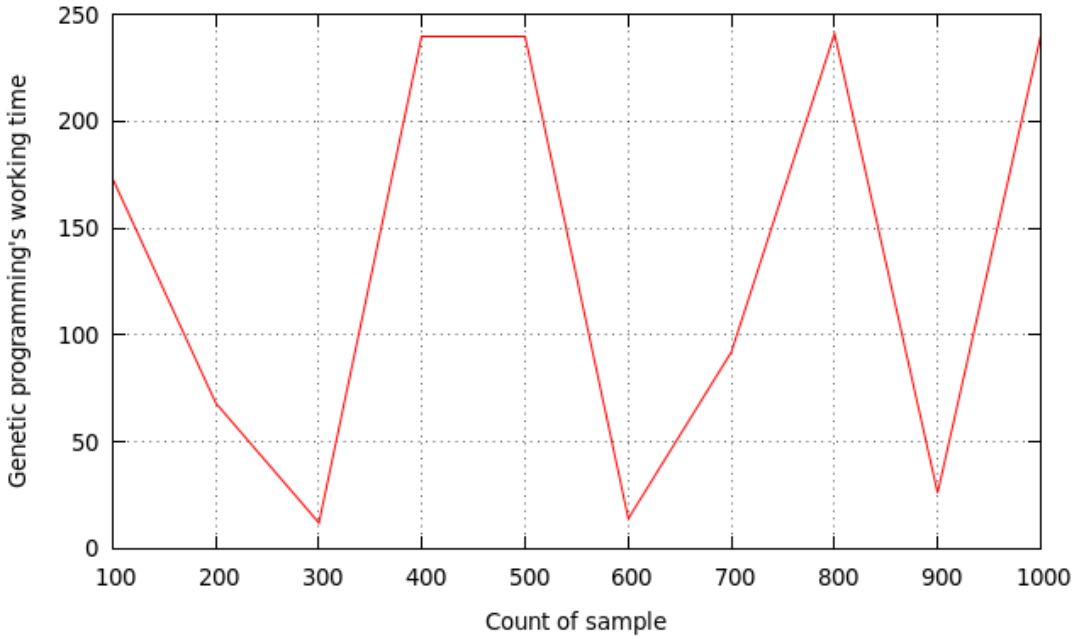


Fig. 7. Dependence of the time of finding the structure on the value of the training sample, example 2

Рис. 7. Зависимость времени нахождения структуры от величины обучающей выборки, пример 2

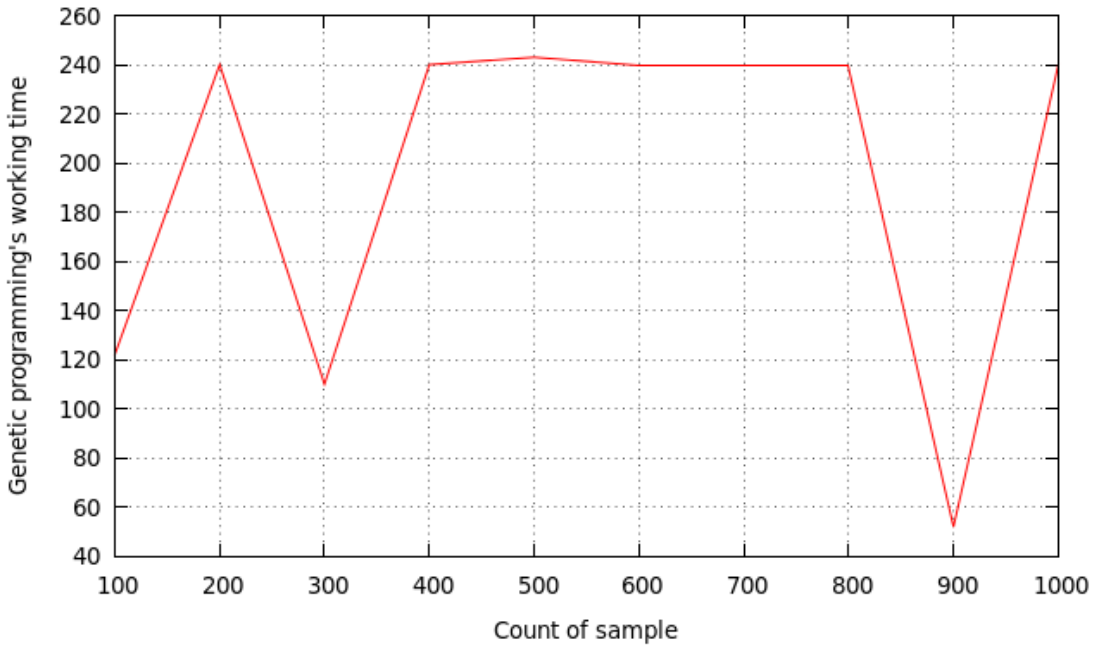


Fig. 8. Dependence of the time of finding the structure on the value of the training sample, example 3

Рис. 8. Зависимость времени нахождения структуры от величины обучающей выборки, пример 3

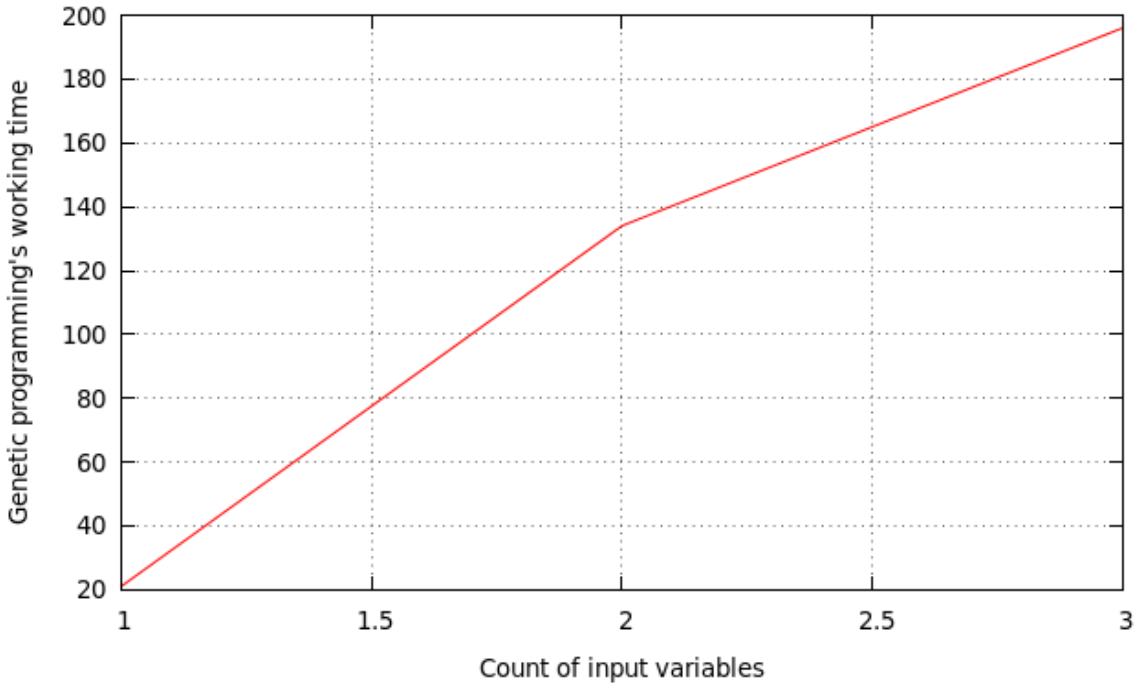


Fig. 9. Dependence of the time of finding the structure on the number of input variables, example 4

Рис. 9. Зависимость времени нахождения структуры от количества входных переменных, пример 4

Conclusion. The method of genetic programming for finding the parametric structure of the inertial-free object has been presented. It has been shown that the time of finding the parametric structure depends on train sample value. Also, the time of finding the parametric structure is dependent on the number of input variables.

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation during the implementation of the comprehensive project for the creation of high-tech production, contract No. 03.G25.31.0279.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, договор № 03.G25.31.0279.

References

1. Tweedle V., Smith R. A mathematical model of Bieber Fever. *Transworld Research Network.* 2012, Vol. 37/661, No. 2, P. 157–177.

2. Soviets B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie sistem* [Modeling of systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 343 p.

3. Antonov A. V. *Sistemnyy analiz* [The system analysis], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004, 454 p.

4. Trusov P. V. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie* [Introduction to mathematical modeling], Moscow, Logos Publ., 2005, 440 p.

5. Medvedev A. V. [Analysis of data in the identification problem]. *Sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnoy konferentsii komp'yuternyy analiz dannykh i modelirovanie*. 1995, Vol. 2, P. 201–207 (In Russ.)

6. Soviets B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie sistem* [Modeling of systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 343 p.

7. Tirsina A. N. *Teoriya sistem i sistemnyy analiz* [Theory of systems and systems analysis]. Chelyabinsk, Znaniya Publ., 2002, 128 p.

8. Skobtsov Yu. A. Osnovy evolyutsionnykh vychisleniy [Fundamentals of evolutionary calculations]. Donetsk. DonNTU Publ., 2008, 326 p.

9. Emelyanov V. V., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya* [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 432 p. (In Russ.).

10. Kureichik V. M., Lebedev B. K., Lebedev O. K. *Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika* [Search adaptation: theory and practice]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 272 p.

11. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic Algorithms], Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 320 p.

12. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. *Bioinspirirovannye metody v optimizatsii* [Bioinspired methods in optimization]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 384 p.

13. Bukatova I. L. *Evolyutsionnoe modelirovanie i ego prilozheniya* [Evolutionary modeling and its applications]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 232 p.

14. Lugger J. *Iskustvennyy intellekt. Strategiya i metody resheniya slozhnykh problem* [Artificial Intelligence. Strategy and methods for solving complex problems], Moscow, Williams Publ., 2003, 864 p.

15. Koza J. R. Genetic Programming. Cambrige / MA: MIT press, 1994, 836 p.

Библиографические ссылки

1. Tweedle V., Smith R. A mathematical model of Bieber Fever // Transworld Research Network. 2012. Vol. 37/661, № 2. P. 157–177.

2. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М. : Высш. шк., 2001. 343 с.

3. Антонов А. В. Системный анализ. М. : Высш. шк., 2004. 454 с.

4. Введение в математическое моделирование / под ред. П. В. Трусова. М. : Логос, 2005. 440 с.

5. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных и моделирование : сб. науч. ст. Междунар. конф. 1995. Т. 2. С. 201–207.

6. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М. : Высш. шк., 2001. 343 с.

7. Теория систем и системный анализ / под ред. А. Н. Тырсина. Челябинск : Знания, 2002. 128 с.

8. Скобцов Ю. А. Основы эволюционных вычислений. Донецк : ДонНТУ, 2008. 326 с.

9. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М. : Физматлит, 2003. 432 с.

10. Курейчик В. М., Лебедев Б. К., Лебедев О. К. Поисковая адаптация: теория и практика. М. : Физматлит, 2006. 272 с.

11. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. М. : Физматлит, 2006. 320 с.

12. Гладков Л. А., Курейчик В. В, Курейчик В. М. Биоинспирированные методы в оптимизации. М. : Физматлит, 2009. 384 с.

13. Букатова И. Л. Эволюционное моделирование и его приложения. М. : Наука, 1994. 232 с.

14. Люггер Дж. Искусственный интеллект. Стратегия и методы решения сложных проблем. М. : Вильямс, 2003. 864 с.

15. Koza J. R. Genetic Programming. Cambrige ; MA : MIT press, 1994. 836 с.

© Mihov E. D., 2017

УДК 519.872

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 773–778

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ GERT-СЕТИ

Т. А. Панфилова, И. А. Панфилов*, В. В. Золотарев, И. В. Ковалев, Е. А. Сопов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: crook_80@mail.ru

Предлагается оригинальный подход к оценке надежности программного обеспечения с помощью модели GERT-сети. Такой подход позволяет моделировать надежность программных комплексов, состоящих из нескольких взаимодействующих программных компонентов. В качестве исходных данных для оценки надежности используются значения оценок надежности отдельных блоков. Такие оценки могут назначаться экспертом, а могут быть получены в результате исследований самого программного комплекса. Были проведены экспериментальные исследования с программной системой «Протокол безопасного обмена данными». Были получены статистические оценки надежности функционирования отдельных программных блоков. С помощью предложенной модели была оценена общая надежность всего программного комплекса.

Предлагается подход к моделированию надежной архитектуры программного комплекса, основанный на идее мультиверсионного программирования. Рассмотрены два различных способа реализации мультиверсионности – NVP и RB.

Задача выбора надежной архитектуры сформулирована в виде задачи многокритериальной смешанной оптимизации с алгоритмически заданными целевыми функциями. Критериями задачи являются общий коэффициент готовности программного комплекса и трудоемкость, которая также зависит от количества и состава программных компонентов комплекса. Задача решается многокритериальным генетическим алгоритмом. Были рассмотрены различные подходы к решению задач многокритериальной оптимизации. Для решения задачи был реализован генетический алгоритм с переменной длиной хромосом, позволяющий кодировать программные архитектуры, различающиеся по количеству и составу компонентов.

В результате применения генетического алгоритма были получены различные варианты программных архитектур разрабатываемого комплекса, отличающиеся от исходной повышенной надежностью. При этом алгоритм предлагал реализовывать множество версий лишь для тех программных компонентов, которые были недостаточно надежны.

Ключевые слова: надежность программного обеспечения, GERT-сети, генетический алгоритм.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 773–778

THE OPERATIONAL MODEL OF A SOFTWARE SYSTEM BASED ON THE GERT-NETWORK

T. A. Panfilova, I. A. Panfilov*, V. V. Zolotarev, I. V. Kovalev, E. A. Sopov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: crook_80@mail.ru

The study proposes an original approach to estimate the reliability of software using the GERT-network model. The approach allows simulating the reliability of software complexes consisting of several interacting software components. As the initial data for reliability evaluation, the values of individual blocks' reliability estimates are used. Such estimations can be assigned by the expert, but also can be obtained as the result of the investigation of the software complex. In this paper, experimental studies were carried out for the "Secure Data Exchange Protocol" software system. Statistical estimates of the reliability for the individual program blocks operating were obtained. Using the proposed model, the overall reliability of the entire software package was estimated.

The article also proposes an approach to modeling a reliable software architecture based on the idea of multiversion programming. The article considers two different ways to implement the multiversion of NVP and RB.

The problem of choosing a reliable architecture is formulated in the form of a multi-objective mixed-typed optimization problem with algorithmically defined objective functions. The criteria to the problem are the overall availability of the software complex and its complexity, which also depends on the number and composition of software components. The problem is solved using a multi-objective genetic algorithm. In the study, various approaches to solving multi-objective optimization problems were considered. A genetic algorithm with a variable length of chromosomes was implemented, which allows encoding software architectures that differ in the number and composition of components.

As a result of the genetic algorithm application, various versions of software architectures of the software complex were obtained, which have better reliability. At the same time, the algorithm has proposed to implement multiply versions only for those software components that were not sufficiently reliable.

Keywords: software reliability, GERT, genetic algorithm.

Введение. Конкуренция на рынке производителей программного обеспечения (ПО) сейчас высока, как никогда. Сокращение сроков разработки ПО, необходимость адаптации программ под различные устройства, необходимость учета программной совместимости и повышенные требования к информационной безопасности – вот неполный перечень причин, почему вопрос о надежности программного обеспечения стоит так остро.

Важнейшим фактором, определяющим качество современного программного продукта, является надежность его функционирования. Этой проблемой занимаются исследователи и производители ПО по всему миру. Программные сбои, приводящие к остановке производств или обслуживания клиентов, ошибки проектировщиков, приводящие к утечкам клиентских данных, – эти проблемы несут колоссальные финансовые и репутационные риски как крупным, так и малым компаниям. Одной из самых известных катастроф, вызванных ошибкой программного обеспечения, была гибель ракетоносителя Ariane 5 в 1996 году [1].

В то же время производители программного обеспечения вынуждены сокращать сроки разработки ПО, использовать унифицированные решения для обеспечения совместимости программных систем, привлекать к разработке удаленных специалистов. То есть, несмотря на высокий запрос на надежное ПО, разработчики вынуждены экономить.

Самый эффективный способ обеспечить надежность функционирования программного обеспечения – это проведение работ на этапе проектирования ПО. Выбор надежной архитектуры программ позволит избежать большинства трудностей и сократить затраты на устранение проблем надежности в будущем. Однако у современных исследователей нет единого подхода даже к определению термина «надежность программного обеспечения». Одни вкладывают в это понятие невосприимчивость к внешним воздействиям, другие – простоту и прозрачность программных решений, исключающую возможность возникновения ошибок [2].

Причин возникновения ошибок и сбоев в программных системах также великое множество: проблемы, связанные с проектированием, аппаратным обеспечением, поведением пользователей в системе, внешними воздействиями на систему. Отсюда и разнообразие подходов к обеспечению надежности. Это требует развития модельно-алгоритмического обеспечения, методов и средств выбора надёжного варианта ПО.

Модели оценки надежности программной системы. В данной работе применяется мультиверсионный подход к обеспечению программной избыточности [3]. Простое дублирование компонентов, как при аппаратном резервировании, недопустимо, так как в отличие от аппаратуры программные ошибки имеют внутреннюю природу и при дублировании не исчезнут. При введении программной избыточности возникновение сбоя в функционально эквивалентных модулях (версиях) на одних и тех же входных данных происходит в различных точках его исполнения, что снижает вероятность общей ошибки системы.

В исследовании используются модели надежности программного обеспечения, использующие для получения оценок различные источники данных. Одна из моделей – коэффициент надежности архитектуры ПО [4]:

$$R = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N_j} PU_{ij} \cdot R_{ij}, \qquad (1)$$

где M – число уровней архитектуры ПО; N_j – число компонентов на уровне j, $j = 1, ..., M$; PU_{ij} – вероятность того, что компонент i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, будет использоваться; R_{ij} – надежность компонента i уровня j.

Значения надежности отдельных компонентов ПО R_{ij} могут быть получены в результате статистической обработки результатов тестирования или могут быть присвоены экспертом. В обоих случаях для расчёта надежности программной системы в целом придется использовать вероятности задействования программных компонентов, оценить которые экспертам непросто.

В рамках данного исследования предлагается метод получения количественных оценок надежности для отдельных программных компонентов и для программных комплексов. В качестве метода моделирования предложены GERT-сети [5].

На рис. 1, где представлен пример фрагмента работы программы для ЭВМ, состояние «1» соответствует работе модуля ввода данных, состояние «2» – это следующий по очередности модуль информационной системы, переход к нему возможен с вероятностью p_1; состояние «3» соответствует системному сбою, который приводит к остановке работы всей программы; состояние «4» описывает работы модуля по корректировке вводимых данных, после которых возможен переход к состоянию «2», «3» или к состоянию «5», соответствующему вызову модуля по ручной корректировке вводимых данных. При этом $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ и $p_4 + p_5 + p_6 = 1$. Состояния «1» и «4» носят вероятностный, а состояния «2», «3», «5» – детерминированный характер.

Моделирование процесса функционирования программного обеспечения GERT-сетью позволяют ответить на следующие вопросы:

1) какова вероятность того, что работа программы приведет к системному сбою;

2) какова вероятность того, что программа продолжит штатную работу;

3) чему равны математическое ожидание и дисперсия времени, необходимого для продолжения штатной работы.

Данный подход по расчету надежности оказывается применим для оценки программных систем, состоящих из нескольких связанных исполняемых программных модулей, когда передача данных из модуля в модуль и активация следующего программного модуля происходят автоматически, без участия пользователя. Такая схема предполагает не только последовательное исполнение модулей, но и варианты с ветвлением дерева исполняемых модулей. Однако если речь идет об участии некоторого пользовательского интерфейса, где инициация того или иного программного модуля зависит от решения пользователя или наборов внешних данных, то моделирование процесса функционирования с помощью GERT-сетей в описанном режиме не представляется возможным.

Получение экспериментальных значений надежности. Для апробации рассмотренных моделей были проведены экспериментальные исследования с программным комплексом «Протокол безопасного обмена данными» (ПБОД) [6]. Логически данный комплекс состоит из пяти программных модулей и двух хранилищ данных. Каждый модуль представлен 5–8 функциональными блоками, исполняемыми последовательно. Были проведены испытания ПБОД, составлены протоколы испытаний. В результате экспериментов были получены статистические оценки надежности функционирования 14-ти функциональных блоков, входящих в различные программные модули комплекса. В табл. 1 представлены количественные значения полученных оценок. Значения коэффициентов готовности для функциональных блоков были рассчитаны по методике, предложенной в [7].

Расчет надежности функционирования программного комплекса. Требовалось получить оценки надежности функционирования как отдельных программных модулей, так и всего комплекса ПБОД в целом. Для этого процесс функционирования каждого модуля был представлен GERT-сетью. Для статистически оцененных компонентов программных модулей в алгоритме были использованы полученные функции плотностей распределения и их характеристики (табл. 1), для остальных компонентов были предложены экспертные оценки. Пример модели функционирования для программного модуля № 5 представлен на рис. 2.

Расчетное значение коэффициента надежности архитектуры ПО согласно методике, предложенной в [7], составило $R5 = 0{,}7589$. Вычисление коэффициента надежности архитектуры ПО по формуле (1) для программного модуля № 5 дало результат $R5 = 0{,}75945375$. Расхождение составило $E5 = 0{,}00055375$.

Для оставшихся программных модулей ПБОД с помощью GERT-сетей были рассчитаны значения коэффициентов готовности R_i. Расхождения с экспертным методом также составили незначительные величины. По формуле (1) был рассчитан коэффициент надежности архитектуры R всего ПБОД (табл. 2).

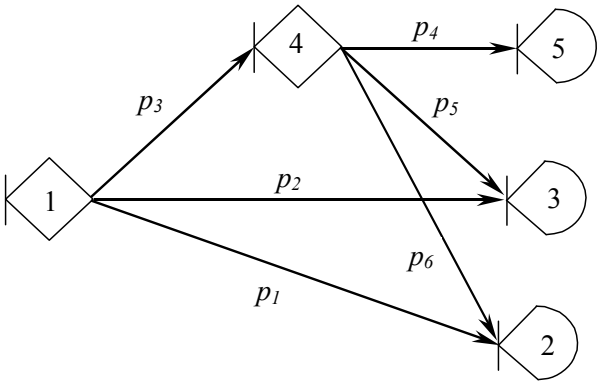


Рис. 1. Пример GERT-сети

Fig. 1. The example of the GERT-network

Таблица 1

Моменты и производящие функции моментов

№ п/п	Тип распределения	$M_E(s)$	Математическое ожидание	Второй момент
1	Экспоненциальное	$\left(1-\frac{s}{a}\right)^{-1}$	3	0,16
2	Нормальное	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	100	0
3	Константа	n	5	0
4	Экспоненциальное	$\left(1-\frac{s}{a}\right)^{-1}$	95	10
5	Экспоненциальное	$\left(1-\frac{s}{a}\right)^{-1}$	0	0

Окончание табл. 1

№ п/п	Тип распределения	$M_E(s)$	Математическое ожидание	Второй момент
6	Экспоненциальное	$\left(1-\frac{s}{a}\right)^{-1}$	0	0,1
7	Нормальное	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	5	0,05
8	Нормальное	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	1000	10
9	Нормальное	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	100	6
10	Нормальное	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	1000	20
11	Нормальное	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	45	0,5
12	Нормальное	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	20	10
13	Константа	n	20	0
14	Экспоненциальное	$\left(1-\frac{s}{a}\right)^{-1}$	5	0,15

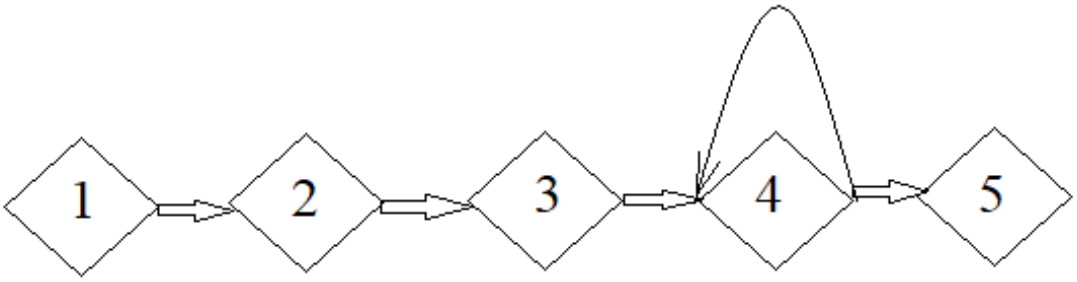


Рис. 2. Модель функционирования программного модуля № 5: 1 – блок доступа к адресной информации; 2 – блок доступа к базе входных данных; 3 – входной интерфейс блока; 4 – блок проверки формата; 5 – блок модификации программного кода

Fig. 2. The model of operation of software module № 5 (1 – Addressing information access block, 2 – Input data access block, 3 – Block input interface, 4 – Format checker block, 5 – Block of modification in the software)

Таблица 2

Результаты расчетов

Номер модуля	Коэффициентов готовности	Ошибка
*R*1	0,87256001	0,00023374
*R*2	0,70564758	0,00065225
*R*3	0,90590065	0,00044870
*R*4	0,65729975	0,00070024
*R*5	0,75945375	0,00055375
ПБОД *R*	0,62007891	

Проектирование надежного варианта программного комплекса. Для обеспечения надежности функционирования программного комплекса был использован мультиверсионный подход. В работе рассмотрено два распространенных подхода в мультиверсионном программном обеспечении: первый подход – мультиверсионное программирование (N-version Programming, NVP), второй подход – блок восстановления (Recovery Block, RB) [8]. Был разработан многокритериальный генетический алгоритм, позволяющий определить эффективные с точки зрения надежности и стоимости разработки программные блоки, подлежащие мультиверсионному дублированию, способ реализаций мультиверсий (NVP или RB), а также количество версий каждого блока.

Задача выбора надежной архитектуры сформулирована в виде задачи многокритериальной смешанной оптимизации с алгоритмически заданными целевыми функциями. Критериями задачи являются общий коэффициент готовности программного комплекса и трудоемкость, которая также зависит от количества и состава программных компонентов комплекса:

$$T_s = \\ = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N_j} \left(B_{ij} T_{ij} + \left(NVP_{ij} + RB_{ij} \right) \cdot \left(NVX_{ij} + \sum_{k \in Z_{ij}}^{K_{ij}} T_{ij}^{k} \right) \right) \quad (2)$$

при ограничении $Z_{ij} \geq 1$, где M – количество архитектурных уровней в архитектуре ПО; N_j – количество компонентов на уровне j, $j \in \{1, ..., M\}$; K_{ij} – глубина программной избыточности компонента i на уровне j; Z_{ij} – множество версий компонента i на уровне j; T_{ij} – трудоемкость разработки компонента i на уровне j; T^k_{ij} – трудоемкость разработки версии k компонента i на уровне j, $k \in Z_{ij}$, чел. ч; NVX_{ij} – трудоемкость разработки среды исполнения версий (приемочного теста для RB – или алгоритма голосования для NVP); B_{ij} – бинарная переменная, принимающая значение 1 (тогда $NVP_{ij} = 0$, $RB_{ij} = 0$), если в программном компоненте не используется программная избыточность, иначе равна 0; NVP_{ij} – бинарная переменная, принимающая значение 1 (тогда $B_{ij} = 0$, $RB_{ij} = 0$), если в программном компоненте введена программная избыточность методом NVP, иначе равна 0; RB_{ij} – бинарная переменная, принимающая значение 1 (тогда $B_{ij} = 0$, $NVP_{ij} = 0$), если в программном компоненте введена программная избыточность методом RB, иначе равна 0; T_s – общая трудоемкость реализации программной системы.

Задача решается многокритериальным генетическим алгоритмом. В исследовании были рассмотрены различные подходы к решению задач многокритериальной оптимизации [9–12]. Для решения задачи был реализован генетический алгоритм (ГА) с переменной длиной хромосом, позволяющий кодировать программные архитектуры, различающиеся по количеству и составу компонентов [4]. Алгоритм был исследован на множестве тестовых задач [13], результаты исследования позволяют говорить о высокой эффективности предложенной модификации. Длина хромосомы в ГА зависит от количества архитектурных уровней M и количества N_i компонентов на i-м уровне. При этом сами M и N_i выступают как переменные задачи. Z_{ij} в хромосоме задают количество версий компонента i на уровне j. На рис. 3 приведен пример кодирования программной архитектуры в виде бинарной хромосомы.

Для ГА с переменной длиной хромосом использовался специальный оператор процентного скрещивания.

В результате применения генетического алгоритма были получены различные варианты программных архитектур разрабатываемого комплекса, отличающиеся от исходной повышенной надежностью. При этом алгоритм предлагал реализовывать множество версий лишь для тех программных компонентов, которые были недостаточно надежны. Результаты работы алгоритма приведены в табл. 3.

Заключение. В данном исследовании был предложен новый способ оценки надежности программных систем. Способ позволяет получать оценки надежности функционирования программной системы на основе оценок надежности функционирования ее компонентов. Был разработан стохастический алгоритм многокритериальной условной оптимизации, позволяющий находить надежные варианты архитектуры ПО с учетом трудозатрат на реализацию ПО и возможностью использования различных подходов к обеспечению отказоустойчивости. Применение в генетическом алгоритме хромосом переменной длины и оператора процентного скрещивания позволило существенно сократить пространство поиска. Разработанный алгоритм был применен для проектирования программной системы с высокими требованиями к надежности. В ходе проведенных с системой экспериментов были получены статистические оценки надежности отдельных ее компонентов, составлена модель функционирования программной системы. В результате применения разработанного генетического алгоритма были предложены архитектуры программной системы, позволяющие существенно улучшить надежность ее функционирования.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, соглашение № RFMEFI57414X0126.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, agreement № RFMEFI57414X0126.

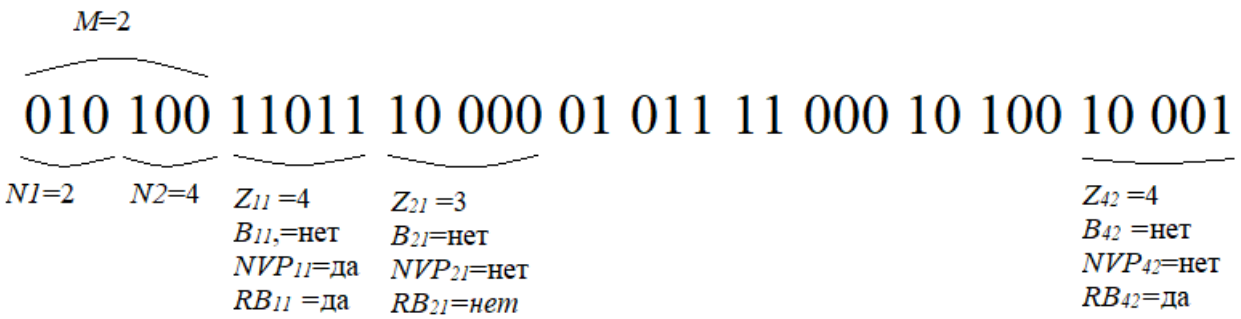


Рис. 3. Пример хромосомы в генетическом алгоритме

Fig. 3. The example of chromosome in the genetic algorithm

Таблица 3

Результаты работы генетического алгоритма

№ решения	Коэффициент готовности системы	Трудозатраты на модернизацию, чел. ч
1	0,92007891	489
2	0,87100579	367
3	0,95411304	523
4	0,96486553	597
5	0,90338740	454
Исходные значения	0,62007891	351

Библиографические ссылки

1. Taverna M. A. Ariane problems force ESA to examine Rosetta options // Aviation Week & Space Technology. 2003. T. 158, № 2. P. 403.
2. Надёжность информационных систем / Ю. Ю. Громов [и др.]. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2010. 160 с. ISBN 978-5-8265-0911-1.
3. Новой А. В. Система анализа архитектурной надежности программного обеспечения : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2011. 131 с.
4. Панфилова Т. А., Панфилов И. А. Формализация задачи выбора надежного варианта программного обеспечения // Вестник СибГАУ. 2008. № 2 (19). С. 26–28.
5. Ковалев И. В., Волкова Г. В. Автоматизированные системы управления / СибГТУ. Красноярск, 2006. 179 с.
6. Styugin M., Parotkin N. Multilevel decentralized protection scheme based on moving targets // International J. of Security and Its Applications. 2016. Vol. 10, iss. 1. Pp. 45–54.
7. Прямой и обратный алгоритм расчета стохастических сетей / Т. А. Панфилова [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 91–96.
8. Avizienis A. The N-Version Approach to Fault-Tolerant Software // IEEE Trans. Soft. Eng. 1985. Vol. SE-11 (12). P. 1511–1517.
9. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms // Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications / J. J. Grefenstette (Ed.). Pittsburgh, PA, 1985. P. 93–100.
10. Fonseca C. M., Fleming P. J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms. Part I. A unified formulation : Technical report 564 / University of Sheffield. Sheffield, UK, 1995.
11. Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D. E. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization // Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. 1994. Vol. 1. P. 82–87.
12. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1999. Vol. 3, No. 4. Pp. 257–271.
13. Иванов И. А., Сопов Е. А. Исследование эффективности самоконфигурируемого коэволюционного алгоритма решения сложных задач многокритериальной оптимизации // Системы управления и информационные технологии. 2013. Вып. 51 (1.1). С. 141–145.

References

1. Taverna M. A. Ariane problems force ESA to examine Rosetta options. *Aviation Week & Space Technology*. 2003. Vol. 158, No. 2, P. 403.
2. Gromov Yu. Yu. *Nadezhnost' informatsionnykh sistem* [Reliability of information systems]. Tambov, Tambov State Technical University, 2010, 160 p.
3. Novoy A. V. *Sistema analiza arkhitekturnoy nadezhnosti programmnogo obespecheniya. Dis. kand. dok. tekhn. nauk* [System for analysis of architectural reliability of software. PhD. techn. sci. diss]. Krasnoyarsk, 2011, 131 p.
4. Panfilova T. A., Panfilova T. A. [Formalization Of Reliable Variant Of Software Choice Problem]. *Vestnik SibGAU*, 2008, No. 2 (19), P. 26–28 (In Russ.).
5. Kovalev I. V., Volkova G. V. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya* [Automated control systems]. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2006, 179 p.
6. Styugin M., Parotkin N. Multilevel decentralized protection scheme based on moving targets. *International J. of Security and Its Applications*. 2016, Vol. 10, Iss. 1, P. 45–54.
7. Panfilova T. A., R. Yu. Tsarev, A. V. Shtarik, E. N. Shtarik, E. R. Khasanov, Panfilova T. A. [Direct and inverse algorithms of stochastic network calculation]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 1 (47), P. 91–96 (In Russ.).
8. Avizienis A. The N-Version Approach to Fault-Tolerant Software. *IEEE Trans.* Soft. Eng. 1985, Vol. SE-11 (12), P. 1511–1517.
9. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In J. J. Grefenstette (Ed.), Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Pittsburgh, PA, 1985, P. 93–100.
10. Fonseca C. M., Fleming P. J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms. Part I: A unified formulation. Technical report 564, University of Sheffield, Sheffield, UK, January 1995.
11. Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D. E. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*. 1994, Vol. 1, Piscataway, P. 82–87.
12. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 1999, Vol. 3, No. 4, P. 257–271.
13. Ivanov I. A., Sopov E. A. Investigation of the self-configured coevolutionary algorithm for complex multi-objective optimization problem solving. *Control Systems and Information Technology*. 2013, No. 51 (1.1), P. 141–145.

© Панфилова Т. А., Панфилов И. А., Золотарев В. В., Ковалев И. В., Сопов Е. А., 2017

УДК 004.056

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 779–787

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОКОЛА ДИНАМИЧЕСКОГО АДРЕСНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ МУЛЬТИКАСТ-ГРУПП

Н. Ю. Паротькин*, И. А. Панфилов, В. В. Золотарев, Е. А. Кушко, Т. А. Панфилова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: nyparotkin@yandex.ru

Предложен протокол на основе алгоритма динамической адресации, в основе которого лежит метод сокрытия узла путем ретрансляции сообщений через групповое вещание. Показан принцип обмена данными при реализации протокола в компьютерной сети. Также представлены результаты экспериментальных исследований для программно-реализованного протокола.

Показано выполнение стандартных тестов элементами программного обеспечения с применением предложенного протокола. Реализация протокола учитывает требования использования в распределенных вычислительных системах. Кроме того, показано полное описание процедуры экспериментальных исследований для реализации сравнительных испытаний. Протокол также пригоден для проведения испытаний по совместимости и пропускной способности.

Ранее предложен алгоритм динамической адресации на основе технологии движущейся цели. Использование указанного алгоритма как основы протокола динамической адресации позволило получить некоторые полезные свойства с точки зрения безопасности. Эти свойства влияют на задержку передачи и снижение пропускной способности, что также отражено в проведенных экспериментальных исследованиях.

Показаны ограничения, применение которых к протоколу может сократить негативное влияние указанных свойств.

Экспериментальные исследования проведены на специальном испытательном стенде. Состав оборудования, использованного для экспериментальных исследований, учитывает требования к протоколу. К основным требованиям отнесены необходимость поддержки технологии защиты на основе движущейся цели и возможность функционирования протокола в распределенных информационно-вычислительных системах. Кроме того, отдельно оценивалась вероятность потери пакетов при передаче.

Представленное решение может быть применено как в задачах безопасного обмена данными в компьютерных сетях, так и в иных смежных задачах. Протокол использует технологию движущейся цели и может быть использован для применения в системах управления наземным оборудованием центров управления полетами для усложнения доступа злоумышленника к конкретным устройствам.

Ключевые слова: безопасность компьютерных сетей, технология движущейся цели, многоадресное вещание.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 779–787

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF DYNAMIC ADDRESS SPACE PROTOCOL ON MULTICAST-GROUPS

N. Yu. Parot'kin*, I. A. Panfilov, V. V. Zolotarev, E. A. Kushko, T. A. Panfilova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: nyparotkin@yandex.ru

In this paper the protocol based on dynamic addressing algorithm is presented. It is based on the node concealment method by relaying messages through the group broadcasting. It shows the principle of data exchange in the process of implementation of the protocol in a computer network. Also the results of experimental studies for the performance of the implemented protocol are presented.

It shows how to perform standard tests for software elements by using the proposed protocol. The protocol implementation accounts the requirements of use in distributed computing systems. In addition, it shows the complete procedure of experimental studies for the realization of comparative tests. The protocol is also suitable for testing compatibility and throughput.

The authors previously proposed the algorithm for dynamic addressing based on the technology of moving target. Usage of a specified algorithm as the basis of dynamic addressing protocol allowed us to obtain some useful properties from the point of view of security. These properties affect the transmission delay and decrease in throughput, which is also reflected in experimental studies.

It shows the limitations, the application of which to the protocol can reduce the negative impact of these properties.

Experimental studies were conducted on the special test stand. The equipment used for experimental research, takes into account the requirements to the protocol. The main requirements related to the need to support technology-based security of a moving target, and the possibility of the operation of the protocol in distributed computing systems. In addition, the probability of packet loss during transmission is separately evaluated.

Presented in the present work, the solution can be applied in the task of secure communication in computer networks, and other related tasks. Protocol uses the moving target technology and can be used for applications in control systems, ground equipment and flight control centers to make it difficult for a hacker to access specific devices.

Keywords: computer network security, moving target defense, multicast broadcasting.

Введение. Удаленные атаки на информационные системы компаний – существенная проблема информационной безопасности на сегодняшний день. Перед осуществлением самой атаки злоумышленник проводит сетевую разведку, в ходе которой собирает данные о структуре локальной сети, об используемых устройствах, программном обеспечении, их версиях и уязвимостях, об используемых средствах защиты. Для того, чтобы затруднить сетевую разведку злоумышленника, применяется технология движущейся цели для перемешивания адресного пространства локальной сети или её сегмента. Алгоритм и разработанный протокол динамической адресации не ограничивает в действиях злоумышленника, а лишь изменяет информацию, на основе которой злоумышленник принимает решение.

В данной статье разработан, реализован и исследован алгоритм динамической адресации, в основе которого лежит метод сокрытия узла путем ретрансляции сообщений через групповое вещание [1].

Используемые технологии. В основе алгоритма динамической адресации лежит технология движущейся цели (ТДЦ) – Moving Target Defense (MTD) [2].

Подход этот находится только на начальном этапе становления и уже привлек к себе серьезное внимание: в условиях распространения технологий виртуализации, программно-конфигурируемых сетей (Software-Defined Network, SDN) и случайным образом формируемой схемы адресного пространства (Address Space Layout Randomization, ASLR) он стал весьма популярен [3].

Исследование безопасности подобных схем приводит к следующим выводам: не должна нарушаться случайность передачи данных; не должен вводиться дополнительный контроль или передаваться дополнительная служебная информация, демаскирующая алгоритм передачи данных; не должны нарушаться требования аутентификации и авторизации.

В работе [4] предлагается реализация алгоритма на основе технологии движущейся цели, реализующего передачу данных по случайно чередующимся каналам связи. Исследование этого алгоритма показывает необходимость дополнительной защиты узлов и использования сетевых протоколов, защищенных от исследования. Исследование этой и подобных работ [2–4] приводит к возможности применения иных протоколов и принципов передачи, базирующихся на ограниченном широковещательном трафике с динамическим адресным пространством и внутренней аутентификацией на основе шифрования с открытым ключом (или стеганографических методов).

В основе алгоритма, предложенного в работе, лежит идея перемещения узлов по мультикаст-группам и передачи данных средствами группового вещания в соответствующие мультикаст-группы [5].

Многоуровневая схема защиты с использованием движущейся цели, включающая как централизованную, так и децентрализованную схемы, может использоваться для полноценной адресации в компьютерных сетях, в том числе распределенных, для противодействия атакам на компьютерные системы различных типов [6–8]. В рамках централизованного подхода с использованием SDN применимы технологии случайного изменения адреса хоста для предотвращения сбора информации о компьютерной сети внешним злоумышленником [5; 9; 10], причем, как показывают исследования, при использовании криптографии этот тип защиты может быть более надежным, в частности, за счет дополнительного обособления случайно выделяемых сегментов сети [1; 11].

Также можно отметить различные подходы к конфигурированию сети, в том числе с использованием случайного изменения адресов, которые приводят к невозможности реализации определенных типов атак [12–15], построению безопасных каналов передачи данных [15], и некоторые другие.

Злоумышленник, который прослушивает весь сетевой трафик, не может установить отправителя пакета и его получателя, так как пакет данных зашифрован и явно не указываются IP-адреса получателя и отправителя, а указаны лишь их идентификаторы.

Принцип работы протокола. Узлы, участвующие в защищенном сегменте сети, подключаются к мультикаст-группе инициализации обмена, в которой происходит обмен идентификаторов участников защищенного сегмента сети. Каждый узел формирует свой список узлов-участников защищенного обмена. Затем каждый узел подключается к двум-трем мультикаст-группам, которые определяются специальным алгоритмом и через которые участники защищенного сегмента сети обмениваются данными. Через интервал времени узел покидает мультикаст-группы обмена данными и заново определяет эти мультикаст-группы по алгоритму выбора новых мультикаст-групп обмена данными.

На рис. 1 изображен защищенный сегмент сети, после того как узлы подключились к мультикаст-группе инициализации обмена и выбрали мультикаст-группы обмена.

Состояние сегмента сети после истечения интервала времени и подключение к новым мультикаст-группам обмена данными отражено на рис. 2. Узлы перемещаются по мультикаст-группам через интервал времени, как показано на рис. 3.

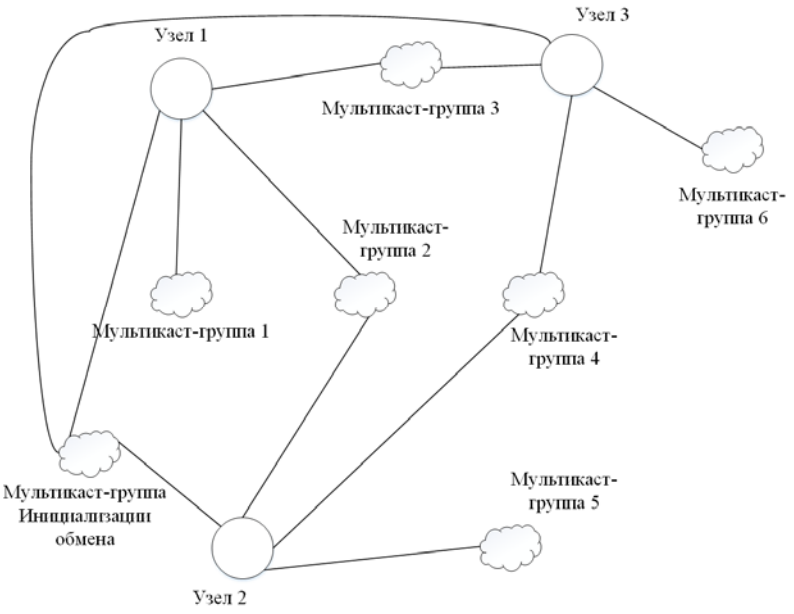


Рис. 1. Защищенный сегмент сети на этапе первой инициализации обмена

Fig. 1. The protected segment of the network during the first initialization of the exchange

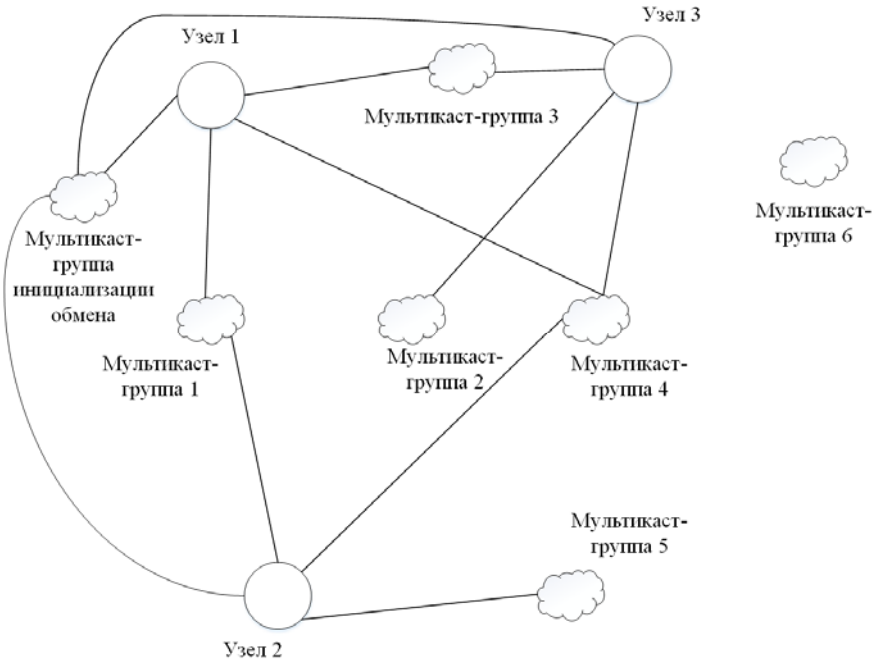


Рис. 2. Состояние защищенного сегмента сети после перемещения узлов
по мультикаст-группам обмена данными

Fig. 2. The state of the protected network segment after moving nodes
by multicast-groups of data exchange

Если узел 1 хочет передать узлу 2 пакет данных, то узел 1 в качестве идентификатора получателя должен указать идентификатор узла 2, который получает узел 1 при подключении к мультикаст-группе для инициализации обмена, а в качестве идентификатора отправителя – свой идентификатор, и отправить пакет данных в каждую мультикаст-группу. В свою очередь, каждый узел-участник мультикаст-группы, в которую был послан пакет, ретранслирует его в другие известные узлу-участнику мультикаст-группы. Так как каждый узел-участник в результате алгоритма выбора мультикаст-группы обмена данных будет иметь хотя бы одну общую мультикаст-группу обмена данных с, как минимум, одним любым другим узлом-участником, то пакет данных гарантированно будет доставлен получателю.

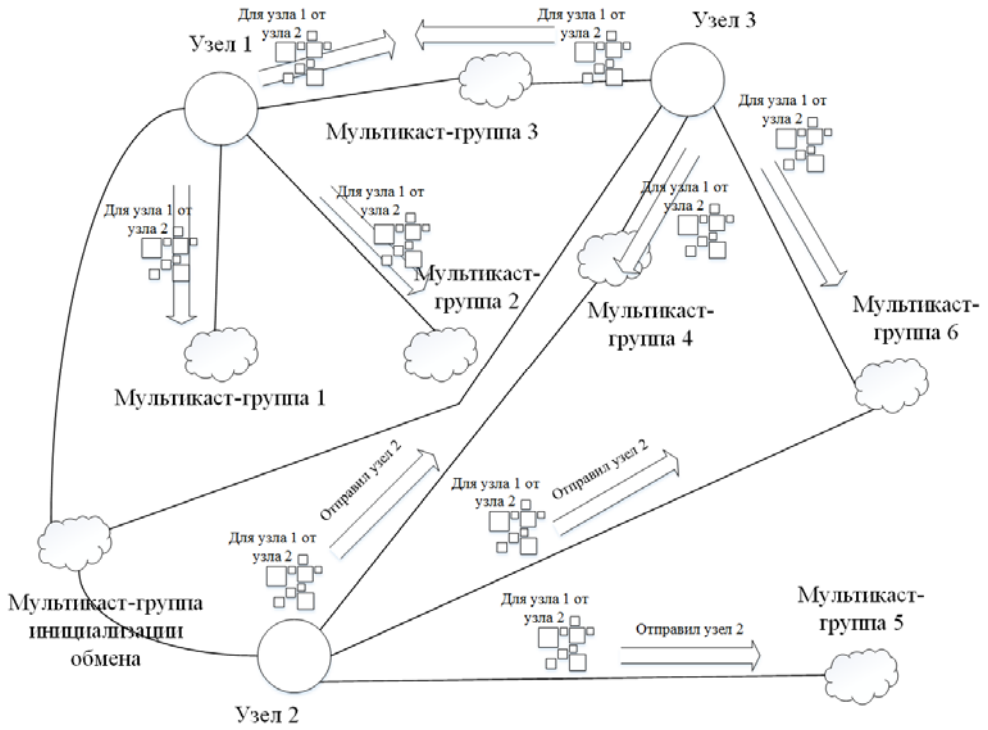


Рис. 3. Обмен данными в защищенном сегменте сети

Fig. 3. Data exchange in a secure network segment

В мультикаст-группу участники защищенного обмена данными не отправляют данные, эта группа предназначена для опроса активных узлов. Каждому пакету данных присваивается идентификатор. Идентификатор пакета необходим для того, чтобы узел мог отбрасывать уже отработанные пакеты данных. Каждый узел формирует базу отработанных пакетов. Узел сравнивает идентификатор пакета с идентификаторами уже отработанных пакетов, для того чтобы отбросить пакет данных, если он уже ранее был обработан. В том случае, если пакет был предназначен данному узлу, то он также ретранслирует его в известные мультикаст-группы обмена данными, в которых узел является участником. Если пакет предназначался не данном узлу и является ранее не обработанным данным узлом, то пакет также ретранслируется (см. рис. 2).

Использование такой последовательности позволяет:

а) контролировать обмен пакетами;

б) контролировать активность мультикаст-групп;

в) корректно описывать процедуру обработки пакетов.

Схема обработки пакетов показана на рис. 4.

Протокол выбора новых мультикаст-групп обмена данными выглядит следующим образом.

Задан общий числовой ключ длиной N. Случайным образом выбирается число q из позиции общего числового ключа. Число m – минуты текущего времени, а h – часы текущего времени. Четвертый октет адреса мультикаст-группы вычисляется следующим образом:

$$net = h + q + (m \% 13).$$

И так для каждой мультикаст-группы. Этот алгоритм срабатывает через каждый интервал времени.

Экспериментальное исследование протокола. Тестирование проводилось на тестовом стенде, который состоял из маршрутизатора Totolink N300RT, обеспечивающего передачу данных до 300 Мбит/с, ноутбука с шестью установленными виртуальными машинами VirtualBox под управлением ОС Lubuntu и Raspberry Pi 2 под управлением ОС Raspbian. За основу взята методика тестирования устройств межсетевых соединений по RFC2544. Тест проводился в трех вариантах.

В ходе данного исследования определяется:

1. Максимальное количество кадров в секунду, которое может быть передано по каналу без ошибок. Оно необходимо для проверки эффективности работы модуля определения маршрутных характеристик при передачи данных пользователя через сеть. Это исследование выполняется, чтобы определить реальную максимальную скорость передачи данных, которую может обеспечить оборудование, а не скорость работы интерфейса отдельного устройства. Данный тест проводится на оборудовании со скоростью доступа к среде передачи в 100 и 1000 Мбит/с.

2. Время прохождения через устройство (или до узла назначения). Если время задержки значительно меняется от кадра к кадру, то это может стать проблемой для работы таких сервисов, как VoIP, IPTV и TDMoIP, через данное оборудование. Например, вариация задержки может выразиться в ухудшении качества голоса, передаваемого с помощью технологии VoIP или в значительном джиттере псевдопроводного потока E1, образованного с помощью технологии TDMoIP. Большое время задержки также может ухудшить качество работы приложений. Исследование необходимо для проверки эффективности работы модуля определения маршрутных характеристик при передаче данных пользователя через сеть.

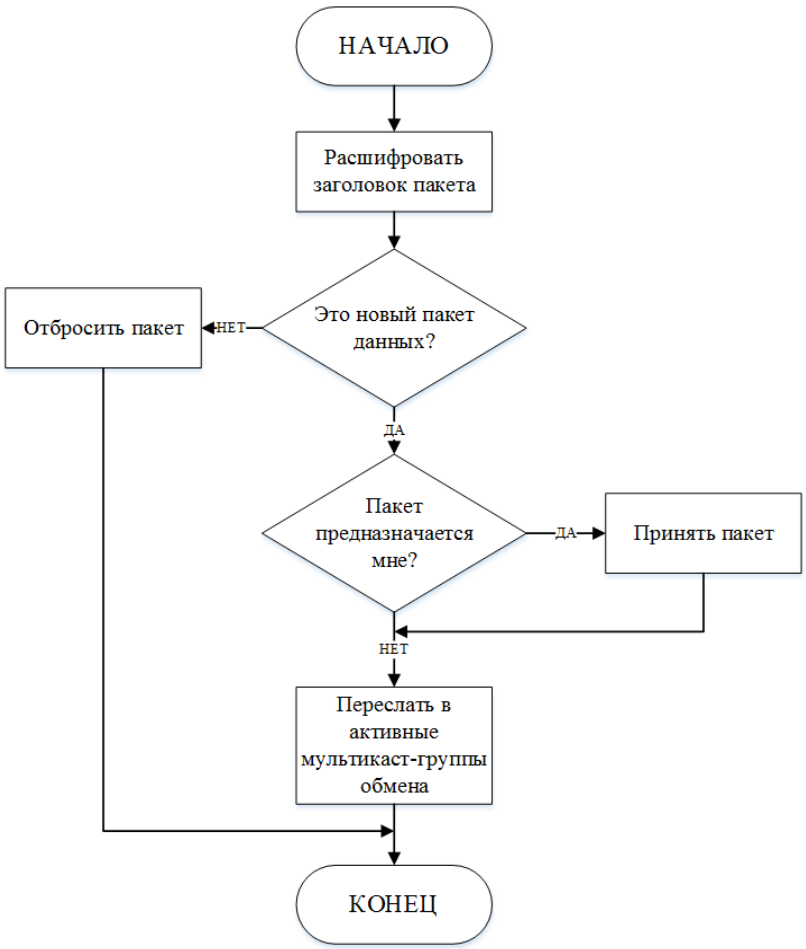


Рис. 4. Обработка входящих пакетов данных

Fig. 4. Processing of incoming data packets

3. Измерение частоты потери кадров необходимо для оценки способности оборудования работать в условиях перегрузки, что является критическим показателем возможности поддерживать приложения реального времени, в которых большое количество потерь резко снижает качество.

Процедура проведения эксперимента. Процедура проведения теста № 1 следующая: послать некоторое количество пакетов N_{tp} на определенной скорости R_p на входной порт устройства. Посчитать пакеты, пришедшие с выходного порта устройства – N_{rp}. Если $N_{rp} < N_{tp}$, скорость R_p уменьшается и тест запускается снова. Пропускная способность – это максимальное $R_{pm} = R_p$, при котором выполняется равенство $N_{rp} = N_{tp}$.

Тест проводился в трех вариантах, когда между узлом-отправителем и узлом-получателем нет ни одного ретранслятора, когда между узлом-отправителем и узлом-получателем один ретранслятор и два ретранслятора. Для этого блокировались изменения адресного пространства в зависимости от приращения времени с целью ручного определения узлов, находящихся на требуемом количестве ретрансляторов друг от друга.

Размеры кадров устанавливались в соответствии с методикой RFC 2544: 64, 128, 256, 1024, 1280, 1518 байт для конечных кадров Ethernet. Для принятия решения о достижении максимальной скорости время безошибочной передачи данных для каждого размера кадров должно быть не менее 60 с. Количество итераций для каждого размера кадра – 10.

Результаты теста (средние значения по итерациям) представлены в табл. 1 и 2.

Процедура проведения теста № 2 начинается с определения R_{pm} (максимальная пропускная способность) для каждого размера пакета. Для каждого размера пакета S_p на соответствующей ему максимальной скорости R_{pm} посылается поток пакетов по определенному адресу. Поток должен иметь длительность минимум 120 с. В 1 пакет по прошествии 60 с вставляется метка. Формат метки – implementation dependent. На передающей стороне записывается время T_a – время, к которому пакет с меткой был полностью отправлен. На приемной стороне определяется метка и записывается время T_b – время полного приема пакета с меткой. Задержка – это разница $T_b - T_a$.

Этот тест должен повторяться минимум 20 раз. По результатам 20 измерений вычисляется средняя задержка.

Тест следует проводить, отправляя весь тестовый поток на один и тот же узел независимо от интервалов перестроения структуры сети.

Результаты эксперимента (средние значения по итерациям) представлены в табл. 3 и 4.

Процедура проведения теста № 3: на вход канала посылается определенное количество кадров N_{tp} на определенной скорости R_p и подсчитывается количество кадров N_{rp}, принимаемых на выходе канала.

Частота потери кадров LR_p рассчитывается следующим образом: $LR_p = ((N_{tp} - N_{rp}) \cdot 100) / N_{tp}$.

Первая попытка должна проходить на максимальной скорости для данного соединения. Следующая попытка должна проходить на 90 % от максимальной скорости, а затем – на 80 %. Повторение попыток с уменьшением скорости тестового потока на 10 % должно продолжаться до тех пор, пока 2 попытки подряд не будут полностью безошибочными ($LR_p = 0$).

Максимальный шаг уменьшения скорости – 10 %.

Согласно методике RFC 6349 величина N_{rp} может быть заменена для протоколов с гарантированной доставкой данных на величину количества повторно отправленных данных.

Исследования проводились для кадров длиной более 256 байт, позволяющих полностью передавать отправляемые сообщения.

Для скорости канала в 1 % бралась скорость, полученная по результатам теста № 1 (табл. 1 и 2).

В табл. 6 показано, насколько влияет использование предлагаемой технологии на процент повторной передачи кадров (или потери кадров) для сети, которая может реально применяться в существующих решениях.

Важность повторного эксперимента с использованием порта в 1000 Мбит/с заключалась в необходимости показать возможность применения разработанного протокола в современных распределенных информационно-вычислительных системах передачи данных.

Кроме того, интересным экспериментом, планируемым на будущее, была бы передача сообщений по разрабатываемому протоколу в беспроводных сетях, где дифференциация скоростей передачи может быть иной.

Результаты данного эксперимента представлены в табл. 5 и 6.

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что происходит падение скорости передачи с увеличением числа ретрансляторов примерно в 1,5 раза на каждый промежуточный узел. Данная особенность протокола отмечается для порта в 100 Мбит/с и, как показано в табл. 6, проверена в эксперименте с портом Gigabit Ethernet.

Повторная передача/потеря кадров при уменьшении пропускной способности канала является минусом протокола, поскольку при его применении используется кадр фиксированной длины.

Для оценки влияния фрагментации на сетевом уровне, а также канального уровня передачи данных эти показатели были повторно оценены в соотвествии с методикой эксперимента для случая с портом Gigabit Ethernet.

Таблица 1

Данные измерения пропускной способности для порта в 100 Мбит/с, Кбайт/с (средние значения по итерациям)

Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора	Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора
64	10	**37**	**17**	**12**	128	10	**61**	**34**	**22**
256	10	**149**	**58**	**44**	1024	10	**667**	**212**	**164**
1280	10	**880**	**421**	**236**	1512	10	**1842**	**667**	**335**

Таблица 2

Данные измерения пропускной способности для порта в 1000 Мбит/с, Кбайт/с (средние значения по итерациям)

Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора	Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора
64	10	**326**	**223**	**138**	128	10	**501**	**411**	**355**
256	10	**1324**	**981**	**797**	1024	10	**6656**	**3572**	**3979**
1280	10	**12320**	**8827**	**5868**	1512	10	**22075**	**13993**	**10073**

Таблица 3

Данные измерения задержки для порта в 100 Мбит/с, мс (средние значения по итерациям)

Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора	Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора
64	20	**11**	**20**	**34**	128	20	**12**	**24**	**39**
256	20	**13**	**23**	**40**	1024	20	**12**	**24**	**43**
1280	20	**14**	**26**	**43**	1518	20	**15**	**27**	**46**

Таблица 4

Данные измерения задержки для порта в 1000 Мбит/с, мс (средние значения по итерациям)

Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора	Размер кадра, байт	Итерации	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора
64	20	**1,8**	**4**	**7,8**	128	20	**2,2**	**5**	**9,05**
256	20	**1,95**	**4,85**	**10,4**	1024	20	**3,3**	**5,1**	**11,7**
1280	20	**3,05**	**6,1**	**11,8**	1518	20	**4,05**	**7,3**	**13,05**

Таблица 5

Процент повторной передачи/потери кадров для порта в 100 Мбит/с

Размер кадра, байт	% максимальной скорости канала	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора
1024	100	100	100	100
	90	73	100	100
	80	46	100	100
	70	41	100	100
	60	35	100	100
	50	33	100	100
	40	29	100	100
	30	24	100	100
	20	20	100	100
	10	10	60	67
	1	0	0	0
1280	100	100	100	100
	90	70	100	100
	80	43	100	100
	70	37	100	100
	60	35	100	100
	50	32	100	100
	40	30	87	100
	30	20	73	90
	20	17	50	60
	10	5	34	46
	1	0	0	0
1518	100	100	100	100
	90	68	100	100
	80	44	100	100
	70	35	100	100
	60	36	100	100
	50	33	100	100
	40	29	89	100
	30	21	71	94
	20	6	51	58
	10	0	34	49
	1	0	0	0

Таблица 6

Процент повторной передачи/потери кадров для порта в 1000 Мбит/с

Размер кадра, байт	% максимальной скорости канала	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора
1024	100	100	100	100
	90	100	100	100
	80	49	100	100
	70	45	100	100
	60	45	100	100
	50	36	100	100
	40	39	100	100
	30	31	100	100
	20	18	100	97
	10	8	60	68
	1	0	0	0
1280	100	100	100	100
	90	100	100	100
	80	43	100	100
	70	37	100	100
	60	32	100	100
	50	29	100	100
	40	31	86	100
	30	22	75	96
	20	17	42	83
	10	6	19	27
	1	0	0	0

Окончание табл. 6

Размер кадра, байт	% максимальной скорости канала	Без ретранслятора	1 ретранслятор	2 ретранслятора
1518	100	100	100	100
	90	98	100	100
	80	40	100	100
	70	36	100	100
	60	38	83	100
	50	32	64	100
	40	27	40	96
	30	18	43	72
	20	5	21	37
	10	0	0	6
	1	0	0	0

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что происходит падение скорости передачи с увеличением числа ретрансляторов примерно в 1,5 раза на каждый промежуточный узел. Данная особенность протокола отмечается для портов как в 100, так и 1000 Мбит/с.

Наибольшую производительность протокол показывает на кадрах максимальной длины, что обусловлено меньшими потерями на ожидание доступа к среде передачи. На кадрах длиной до 256 байт не получается полностью разместить пакет данных, и происходит фрагментация на сетевом уровне, что еще в большей мере увеличивает накладные расходы на передачу данных.

Увеличение скорости передачи на Gigabit Ethernet обусловлено функцией режима пульсации на канальном уровне.

Заключение. Поскольку во время проведения тестирования в среде практически отсутствовал дополнительный трафик, то были получены результаты для идеальных условий. При использовании в реальной высоконагруженной сети скорость передачи может снизиться. Малое отклонение результатов на каждой итерации обусловлено стабильностью функционирования сети передачи и коммуникационного оборудования.

Также было подтверждено, что происходит увеличение времени передачи с количеством промежуточных узлов примерно в 2 раза на каждый дополнительный промежуточный узел. Данная особенность протокола отмечается для портов как в 100, так и 1000 Мбит/с. Наименьшую задержку протокол показал для кадров минимальной длины, поскольку их доставка занимает минимальное время, и задержки вносятся в основном узлом при обработке кадра. С увеличением стороннего трафика в сети будет также увеличиваться временная задержка, поскольку многоадресный трафик по умолчанию имеет меньший приоритет по сравнению с одноадресным. Для устранения данного недостатка необходимо использовать технологии QoS на коммутирующем оборудовании для повышения приоритета трафика из используемого диапазона мультикаст-групп.

Было показано, что при превышении максимальной скорости передачи, установленной по программе экспериментальных исследований при проведении теста № 1 (см. выше), начинается лавинообразный процесс потери данных. Данный факт обусловлен необходимостью обработки поступающих данных и проявляется в существенно большей степени при наличии в канале 1 и 2 ретрансляторов. Полученные данные согласуются с величинами задержек, полученными в ходе экспериментальных исследований. Следовательно, протокол необходимо эксплуатировать в неперегруженном режиме, и особое внимание следует уделить проверке корректности работы механизма гарантированной доставки данных. Полученные данные для определенной максимальной скорости передачи соответствуют установленным показателям и позволяют говорить о 20%-м запасе производительности с увеличением скорости передачи. Для достижения скоростей передачи, достаточных для стандартной работы, рекомендуется использование подключения и оборудование на основе Gigabit Ethernet.

Благодарности. Работа поддержана Минобрнауки России в рамках контракта № 14.574.21.0126 от 27.11.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0126.

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia under the contract No. 14.574.21.0126 of 27.11.2014, the unique identifier of the project RFMEFI57414X0126.

Библиографические ссылки

1. Стюгин М. А., Паротькин Н. Ю., Золотарев В. В. Обеспечение безопасности узла сокрытием в динамической сетевой топологии // Решетневские чтения. 2015. Т. 2 (19). С. 300–302.

2. Analysis of network address shuffling as a moving target defense / T. E. Carroll [et al.] // IEEE Intern. Conf. on Communications, ICC 2014. 2014. Pp. 701–706.

3. Карвальо М., Форд Р. Защита сетей путем создания движущихся целей // Открытые системы. 2014. № 4.

4. Мельниченко П. А. Метод варьирования маршрутов для противодействия угрозам информационной безопасности в открытых компьютерных сетях типа Интернет : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск : ТУСУР, 2009. 24 с.

5. Styugin M., Parotkin N. Multilevel decentralized protection scheme based on moving targets // International J. of Security and Its Applications. 2016. Vol. 10, iss. 1. Pp. 45–54.

6. Moving Target Defense. Creating Asymmetric Uncertainty for Cyber Threats. Series: Advances in Information Security / S. Jajodia [et al.]. 2011. 184 p.

7. Moving Target Defense II. Application of Game Theory and Adversarial Modeling. Series: Advances in Information Security / S. Jajodia [et al.]. 2013. 203 p.

8. Carvalho M. Moving Target Defenses for Computer Networks [Электронный ресурс] // IEEE Security and Privacy. 2014. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6798537, DOI: 10.1109/MSP.2014.30 (дата обращения: 28.11.2014 г.).

9. Jafar Haadi Jafarian Q. D., Ehab Al-Shaer. Openflow random host mutation: Transparent moving target defense using software-defined networking // Proceedings of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking (HotSDN). 2012. P. 127–132.

10. Styugin M. Multilevel Decentralized Protection Scheme Based on Moving Target // Proceedings of The 12th International Conference on Security and Cryptography (SECRYPT 2015). 2015. Pp. 213–221.

11. Mission-oriented moving target defense based on cryptographically strong network dynamics / J. Yackoski [et al.] // ACM International Conference Proceeding Series. 8th Annual Cyber Security and Information Intelligence Research Workshop: Federal Cyber Security R and D Program Thrusts (CSIIRW 2013). 2013. Pp.120–121.

12. Model-driven, moving-target defense for enterprise network security / S. A. DeLoach [et al.] // Dagstuhl Seminar 11481 on Models@run.time. LNCS 2014. 2014. Pp. 137–161.

13. Al-Shaer E., Duan Q., Jafarian J. H. Random host mutation for moving target defense // 8th International ICST Conference on Security and Privacy in Communication Networks, SecureComm 2012. 2013. Vol. 106 LNICS. Pp. 310–327.

14. A self-shielding dynamic network architecture / J. Yackoski [et al.] // Proceedings IEEE Military Communications Conference MILCOM. 2011. Pp. 1381–1386.

15. Network configuration in a box: Towards end-to-end verification of network reachability and security / E. Al-Shaer [et al.] // Proceedings International Conference on Network Protocols. 2009. Pp. 123–132.

References

1. Styugin M. A., Parotkin N. Y., Zolotarev V. V. [Security of network node by concealing in dynamic network topology]. *Reshetnevskie chteniya.* 2015, Vol. 2 (19), P. 300–302 (In Russ.).

2. Carroll T. E., Crouse M., Fulp E. W., Berenhaut K. S. Analysis of network address shuffling as a moving target defense. *IEEE International Conference on Communications, ICC 2014*. 2014, P. 701–706.

3. Carvalho M., Ford R. Moving Target Defenses for Computer Networks. *Open Systems J*. 2014.

4. Melnichenko P. *Metod var'irovaniya marshrutov dlya protivodeystviya ugrozam informatsionnoy bezopasnosti v otkrytykh komp'yuternykh setyakh tipa Internet. Dis. kand. tekhn. nauk* [The method of routes variation to counter information security threats in open computer networks. Dis. Cand. tech. science]. Tomsk, 2009, 24 p.

5. Styugin M., Parotkin N. Multilevel decentralized protection scheme based on moving targets. *International J. of Security and Its Applications.* 2016, Vol. 10, Iss. 1, P. 45–54.

6. Jajodia S., Ghosh A. K., Swarup V., Wang C., Wang X. S. Moving Target Defense. Creating Asymmetric Uncertainty for Cyber Threats. Series: Advances in Information Security, 2011, 184 p.

7. Jajodia S., Ghosh A. K., Swarup V., Wang C., Wang X. S. Moving Target Defense II. Application of Game Theory and Adversarial Modeling. Series: Advances in Information Security, 2013, 203 p.

8. Carvalho M., Moving Target Defenses for Computer Networks, 2014, IEEE Security and Privacy. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6798537. DOI: 10.1109/MSP.2014.30 (accessed 28.11.2014).

9. Jafar Haadi Jafarian Q. D., Ehab Al-Shaer. Openflow random host mutation: Transparent moving target defense using software-defined networking, 2012. Proceedings of the 1st Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking (HotSDN). P. 127–132.

10. Styugin M. Multilevel Decentralized Protection Scheme Based on Moving Target, 2015. Proceedings of The 12th International Conference on Security and Cryptography (SECRYPT 2015). P. 213–221.

11. Yackoski J., Li J., Deloach S. A., Ou X. Mission-oriented moving target defense based on cryptographically strong network dynamics, 2013. ACM International Conference Proceeding Series. 8th Annual Cyber Security and Information Intelligence Research Workshop: Federal Cyber Security R and D Program Thrusts, CSIIRW 2013. P. 120–121.

12. DeLoach S. A., Ou X., Zhuang R., Zhang S. Model-driven, moving-target defense for enterprise network security, 2014. Dagstuhl Seminar 11481 on Models@run.time. LNCS, 2014, P. 137–161.

13. Al-Shaer E., Duan Q., Jafarian J. H. Random host mutation for moving target defense, 2012. Al-Shaer, 8th International ICST Conference on Security and Privacy in Communication Networks, SecureComm 2012. 2013, Vol. 106 LNICS, P. 310–327.

14. Yackoski J., Xi P., Bullen H., Li J., Sun K. A self-shielding dynamic network architecture, 2011. Proceedings IEEE Military Communications Conference MILCOM. 2011. P. 1381–1386.

15. Al-Shaer E., Marrero W., El-Atawy A., El-Badawi K. Network configuration in a box: Towards end-to-end verification of network reachability and security, 2009. Proceedings International Conference on Network Protocols, ICNP, 2009, P. 123–132.

© Паротькин Н. Ю., Панфилов И. А.,
Золотарев В. В., Кушко Е. А., Панфилова Т. А., 2017

УДК 339.13.017

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 788–795

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ ЖИЛЬЯ НА ВТОРИЧНОМ РЫНКЕ НЕДВИЖИМОСТИ В Г. КРАСНОЯРСКЕ В 2016 ГОДУ

О. В. Пашковская, С. И. Сенашов*, И. Л. Савостьянова, Н. Ю. Юферова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: sen@sibsau.ru

Собраны и проанализированы данные по стоимости вторичной жилой недвижимости в г. Красноярске за 2016 г. Количество объектов в 2016 г. – 1239 штук. Каждая квартира характеризуется 9 параметрами: количество комнат, планировка, микрорайон, этаж, материал стен, общая площадь, жилая площадь, площадь кухни, наличие балкона или лоджии. На основе метода наименьших квадратов (МНК) построена адекватная линейная модель стоимости квартиры в обычном и стандартизованном виде. При построении модели проанализировано влияние количественных и качественных факторов. Ранжированы коэффициенты престижности районов и материала стен. Ранжирование проводилось на основе выделения типичной квартиры. В качестве типичной квартиры были взяты однокомнатные квартиры как наиболее часто продаваемые. Характеристики типичной квартиры: общая площадь – 30,6 м^2, жилая площадь – 17,7 м^2, площадь кухни – 5,5 м^2, планировка – хрущевка, 1 этаж (количество этажей – 5), санузел – смежный, плита – электрическая, балкон – есть, материал стен – панель. При построении коэффициентов престижности вводились 24 фиктивные переменные, а для материала стен – восемь фиктивных переменных. Показано, что при развитии города коэффициенты престижности районов города меняются, иногда очень существенно. Приведена адекватная модель зависимости цены жилого объекта от экологического состояния района. Рассчитаны коэффициенты престижности для атрибутивных факторов, построена регрессионная модель, содержащая такие факторы, как цена, общая площадь, планировка, микрорайон, материал стен, со статистически значимыми факторами – общая площадь, планировка, микрорайон. Это сделано и в стандартизированной форме. Проведенное исследование подтверждает высокое влияние на цену квартиры, предлагаемой к продаже, общей площади и микрорайона, а также умеренное влияние планировки. Построенные модели адекватно описывают опытные данные.

Ключевые слова: стоимость жилья, МНК, линейная регрессионная многофакторная модель.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 788–795

MODELING THE COST OF HOUSING ON THE SECONDARY REAL ESTATE MARKET IN THE CITY OF KRASNOYARSK IN 2016

O. V. Pashkovskaya, S. I. Senashov*, I. L. Savostyanova, N. Yu. Yuferova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: sen@sibsau.ru

The authors collected and analyzed data on the cost of the secondary residential property in the city of Krasnoyarsk in 2016. The Number of objects in 2016 is 1239 pieces. Each apartment is characterized by nine parameters. Based on the method of least squares (OLS) is an adequate linear model of the cost of an apartment in a regular and standardized form. When building the model the influence of quantitative and qualitative factors was analyzed. The factors of the prestige of the areas and wall material were ranked. The ranking was conducted based on the allocation of a typical apartment. A Studio apartment was taken as a typical apartment, as the most frequently sold.

When we built the coefficients of the prestige, 24 dummy variables were introduced, and for the material of the walls the eight dummy variables were introduced. We show that urban development factors in the prestige areas of the city are changing, sometimes dramatically. The authors gave an adequate model of dependence of the prices of residential property from the environmental condition of the area. The coefficients of "prestige" for attribute factors were calculated, the article builds a regression model containing the factors: price, total area, layout, floor, and wall material: statistically significant factors total area, the layout, the neighborhood. It was done in a standardized way. This study confirms the high influence on the price of the apartment, offered for sale, the total area of the district, and a moderate impact of layout. The constructed models adequately describe experimental data.

Keywords: cost of the secondary residential property, OLS, GLS, multivariable linear regression model.

Введение. Актуальность моделирования стоимости жилья в современных российских условиях определяется такими факторами, как интерес собственников к оценке объектов своей жилой недвижимости и перспективы налогообложения жилой недвижимости.

Ранее стоимость вторичного жилья за период 1998–2015 гг. в г. Красноярске изучалась в работах [1–6]. Моделирование в других городах обсуждается в [7] и цитируемой там литературе.

Моделирование стоимости жилья на вторичном рынке недвижимости в г. Красноярске в 2016 году начнем с анализа рынка и сбора данных. Если рассматривать величину спроса, то относительно распределения предпочтений между однокомнатными и многокомнатными квартирами она не изменилась – около 60 % сделок на вторичном рынке охватывают сектор однокомнатных квартир, менее востребованными являются двухкомнатные квартиры, а трехкомнатные и четырехкомнатные пользуются наименьшим спросом.

Повышенным спросом пользовалось малогабаритное жилье, которое преимущественно находится на окраинах города.

Достаточное количество информации позволило сформировать базу данных [8]. Работа с базой данных представляет собой устранение орфографических ошибок, допущенных при сборе информации, замену символьных названий (заменяются соответствующими численными аналогами, которые были установлены практическим путем в ходе опросов и предыдущих исследований). Результатом этого этапа моделирования стоимости вторичного жилья является готовая база данных, к которой можно применить методы математико-статистического анализа.

Для начала необходимо определиться с видом модели, которая будет использоваться для прогнозирования стоимости жилья в г. Красноярске. Существует три вида моделей: аддитивная, мультипликативная, агрегатная. В своей работе мы использовали аддитивную модель, представленную формулой линейной регрессии, так как она является простой и надежной, предъявляет менее жесткие требования к количеству исходной информации, лучше приспособлена для учета возможных зависимостей между параметрами. Регрессионный анализ проведен на основе МНК, при помощи которого минимизируется сумма квадратов отклонения наблюдаемых значений переменной от предсказанных моделью [9].

В базе данных за 2016 год насчитывается 1239 квартир. Каждая квартира характеризуется 9 параметрами. Имеются данные о цене на квартиру и значении различных факторных признаков. Среди факторных признаков 3 количественных – общая площадь (x_1), жилая площадь (x_2), площадь кухни (x_3), и 6 атрибутивных (качественных) – планировка (x_4), микрорайон (x_5), этаж (количество этажей) (x_6), санузел (x_7), плита (x_8), балкон (x_9).

Влияние количественных факторов на цену квартиры. Анализ начнем с оценки влияния количественных признаков. Построим линейную регрессионную модель в Microsoft Excel: общая площадь (x_1), жилая площадь (x_2), площадь кухни (x_3).

В результате построения модели получили линейную регрессионную модель, все коэффициенты которой статистически значимы с вероятностью 95 %:

$$\hat{y} = -778,2 + 72,5x_1 - 8,6x_2 + 34,5x_3, \quad (1)$$

где $\hat{y}$ – цена квартиры.

Чтобы оценить силу влияния каждого регрессора, построим стандартизированную модель, т. е. перейдем к ортогонализованным признакам:

$$z_j = \frac{x_j - \overline{x}_j}{s_j},$$

где $\overline{x}_j$ – среднее для j-го фактора; s_j – среднее квадратичное отклонение для j-го фактора.

Таким образом, получили стандартизированную линейную регрессионную модель, все коэффициенты которой статистически значимы с вероятностью 95 %:

$$\hat{z} = 0,85z_1 - 0,07z_2 + 0,08z_3. \quad (2)$$

Обратим внимание, что коэффициент при втором факторном признаке в формулах (1) и (2) отрицательный: –8,6 и –0,07. Таким образом, увеличение этого признака (жилая площадь) приводит к уменьшению результативного (цена), что не соответствует экономическому содержанию этих переменных.

Это связано с тем, что наблюдается тесная корреляционная зависимость между факторными признаками – общей площадью (x_1) и жилой площадью (x_2).

При наличии такой тесной связи рекомендуется не включать в модель один из признаков, так как это может привести к плохой обусловленности матрицы $X^T X$ и ухудшению полученных оценок параметров регрессии. Поэтому в дальнейшем регрессор – жилая площадь (x_2) – исключим из рассмотрения. Построим регрессионную модель $Y = Y(X_1, X_3)$:

$$\hat{y} = -773,01 + 67,62x_1 + 34,02x_2, \quad (3)$$

или в стандартизированном виде:

$$\hat{z} = 0,80z_1 + 0,08z_3. \quad (4)$$

Таким образом, видно, что существенное влияние на результативный признак (цена) оказывает только регрессор x_1 (общая площадь): при изменении этого признака на величину среднего квадратичного отклонения (СКО), т. е. на 28,52 м^2 (s_1 = 28,52), результативный признак увеличится на 0,80 СКО, т. е. на 1928,86 тыс. руб. Влияние регрессора x_3 (площадь кухни) не так значительно: при изменении этого признака на величину среднего квадратичного отклонения, т. е. на 5,41 м^2 (s_3 = 5,41), результативный признак увеличится на 0,08 СКО, т. е. на 183,95 тыс. руб.

Влияние качественных факторов на цену квартиры. Введем в модель атрибутивный признак «планировка» (x_4). Для анализа влияния этого признака введем 8 фиктивных переменных $(d_1, d_2, ..., d_8)$, так как сам атрибутивный признак принимает 9 различных значений-атрибутов.

Построим регрессионную модель в программе Statistica:

$$\hat{y} = -332,45 + 66,87x_1 + 40,35x_2 + 86,10d_1 - \\ -1358,88d_2 + 180,16d_3 - 661,91d_4 - 841,72d_5 - \\ -1034,16d_6 - 821,28d_7 - 441,82d_8, \quad (5)$$

или в стандартизированном виде:

$$\hat{t} = 0,79z_1 + 0,009z_3 + 0,01f_1 - 0,08f_2 + 0,02f_3 - \\ - 0,08f_4 - 0,11f_5 - 0,08f_6 - 0,06f_7 - 0,09f_8. \quad (6)$$

Оценим влияние каждого регрессора с помощью стандартизированных коэффициентов и частных коэффициентов корреляции.

Так как атрибутивный признак представлен с помощью 8 фиктивных переменных, влияние этого признака (планировка) определим с помощью совокупного коэффициента корреляции (весами будут служить стандартизированные коэффициенты регрессии).

Влияние этого регрессора (планировка) на результативный признак (цена) незначительна: $r = 0,06$.

Формируя однородную совокупность, рассмотрим только однокомнатные квартиры, цена на которые не выходит за пределы 3σ-го интервала ($\bar{y} - 3\sigma \le y \le \bar{y} + 3\sigma$). Для выявления наиболее часто встречающейся цены квартиры, предлагаемой к продаже в 2016 г., сгруппируем данные и вычислим моду (табл. 1):

$$M_0 = x_0 + h\frac{f_{Mo} - f_{Mo-1}}{(f_{Mo} - f_{Mo-1}) + (f_{Mo} - f_{Mo+1})} = \\ = 1585,5 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, на рынке наиболее часто предлагаются однокомнатные квартиры по цене от 1433,8 до 1667,0 тыс. руб. (рис. 1).

Характеристики типичной квартиры: общая площадь – 30,6 м^2, жилая площадь – 17,7 м^2, площадь кухни – 5,5 м^2, планировка – хрущевка, 1 этаж (количество этажей – 5), санузел – смежный, плита – электрическая, балкон – есть, материал стен – панель.

Рассмотрим влияние атрибутивного признака «планировка» на цену квартиры.

Для анализа влияния этого признака введем 4 фиктивных переменных $(d_1, d_2, ..., d_4)$, так как сам атрибутивный признак принимает 5 различных значений-атрибутов. Получим стандартизированную линейную регрессионную модель:

$$t_{\hat{y}} = 180,2t_{d_1} + 90,4t_{d_2} + 83,4t_{d_3} + 60,0t_{d_4}. \quad (7)$$

Таблица 1

Группировка предложенных к продаже квартир по цене, 2016 г.

№	Цена, тыс. руб.		Середина интервала	Число квартир	Накопленная частота
1	734,0	967,3	850,6	1	1
2	967,3	1200,5	1083,9	9	10
3	1200,5	1433,8	1317,1	28	38
4	1433,8	1667,0	1550,4	69	107
5	1667,0	1900,3	1783,6	47	154
6	1900,3	2133,5	2016,9	25	179
7	2133,5	2366,8	2250,1	6	185
8	2366,8	2600,0	2483,4	2	187
Итого			1665,4	187	–

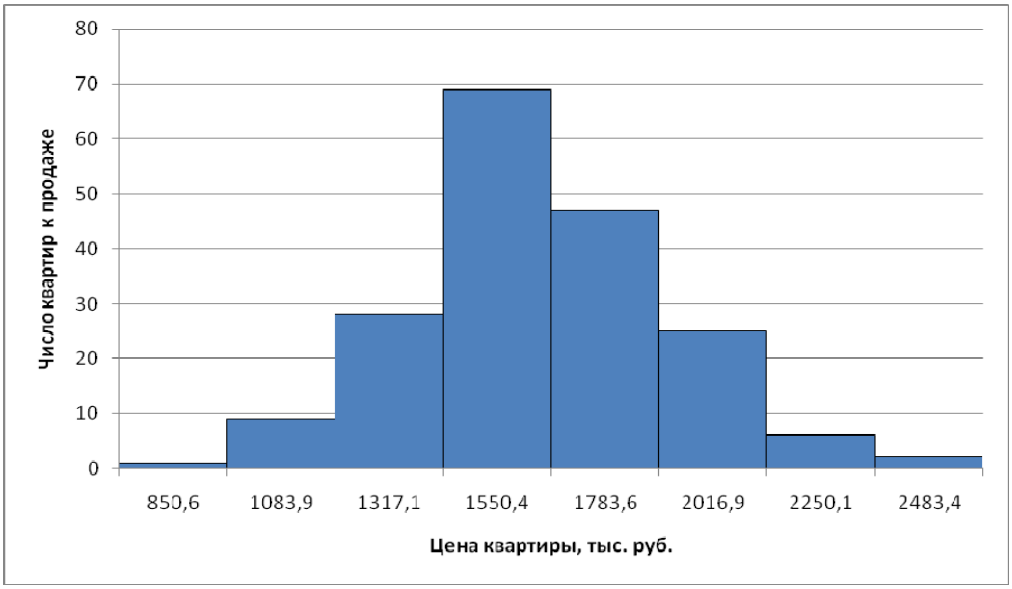


Рис. 1. Распределение предложенных к продаже квартир по цене

Fig. 1. Distribution of apartments offered for sale at a price

В результате расчетов получились коэффициенты престижности, представленные в табл. 2.

Рассмотрим влияние атрибутивного признака «материал стен» на цену квартиры.

Для анализа влияния этого признака введем 2 фиктивные переменные (d_1, d_2), так как сам атрибутивный признак принимает 3 различных значения-атрибута. Получим стандартизированную линейную регрессионную модель:

$$t_{\hat{y}} = 81{,}9t_{d_1} + 78{,}1t_{d_2}. \quad (8)$$

В результате расчетов получились коэффициенты престижности, представленные в табл. 3.

Сравнительный анализ престижности районов г. Красноярска. В зарубежной и отечественной литературе по оценке объектов недвижимости местоположение жилого объекта является одним из важных факторов, влияющих на цену объекта.

Существует много возможностей учета параметра района в моделях оценки жилья. Например, местоположение квартиры в Москве определяется расположением ближайшей станции метро и расстоянием от метро в минутах пешком либо наземным транспортом. Также в Москве и Санкт-Петербурге при оценке жилья учитывается деление на районы по административному признаку или в зависимости от удаленности от центра города.

Говоря о престижности районов любого города, необходимо учитывать две ее характеристики: так называемую традиционную престижность и престижность индивидуальную.

Под традиционной престижностью понимают те факторы, которые являются определяющими при выборе квартиры для большинства жителей города.

Индивидуальный подход к выбору жилья также существует всегда. Эта субъективная характеристика престижности, скорее всего, может быть охарактеризована как привлекательность того или иного района.

Так, традиционными факторами престижности района всегда считались близость к историческому центру города, центрам торговли, наличие развитой инфраструктуры в районе, парковочных мест, его благоустройство и озеленение [10].

В более ранних исследованиях авторами уже была проведена оценка привлекательности районов г. Красноярска для покупателей жилой недвижимости [10].

На основе данных предложения однокомнатных квартир на рынке вторичного жилья в 1998 г. были рассчитаны коэффициенты престижности для каждого из районов города. Для того чтобы эти коэффициенты не включали влияние внутренних характеристик квартиры на ее стоимость, из основной базы данных были выбраны жилые объекты с одинаковыми параметрами. Таким образом, был произведен выбор так называемой эталонной квартиры [1].

При выявлении типичного объекта в качестве базовых параметров были приняты следующие: общая площадь, жилая площадь, площадь кухни, планировка, материал стен, этаж.

В процессе поиска типичной квартиры вариант расчета средних значений параметров площади был отвергнут. Это произошло вследствие того, что в качестве эталонного объекта должна предстать конкретная реально существующая квартира. Было решено рассчитать моду для всего количества наблюдений, т. е. величину признака, чаще всего встречающуюся в данной выборке.

Характеристики типичной квартиры приведены выше.

Далее каждый район был закодирован нами посредством двух фиктивных переменных. Например, Взлетка (0 или 1), Центр (0 или 1) и т. д. Теперь каждому району присвоим свою фиктивную переменную, которая для этого района будет равна 1, все остальные фиктивные переменные для этого района равны 0. В итоге получим матрицу фиктивных переменных размерностью в M–1 столбцов и N строк, где M – это количество районов, а N – количество наблюдений, которую добавим в исходные данные [2].

На основании матрицы фиктивных переменных были рассчитаны коэффициенты для каждого района г. Красноярска (табл. 4).

Задачей данного исследования авторы статьи поставили себе сравнение показателей престижности 1998 и 2016 гг.

В качестве исходных данных использовалась база данных однокомнатных квартир, состоящая из 546 жилых объектов, выставленных на продажу на рынке вторичного жилья в 2016 году.

За прошедшие 18 лет Красноярск существенно видоизменился, многие фабрики и заводы прекратили свое существование, началось превращение промышленных территорий в жилые кварталы или коммерческие центры. Появление новых микрорайонов не могло не повлиять на сложившуюся престижность старых районов города. Для корректного сравнения авторы использовали в исследовании лишь квартиры, выставленные на продажу и указанные в табл. 1. В результате расчетов фиктивных переменных для объектов предложения на рынке недвижимости в 2016 г. были получены новые показатели престижности (табл. 5).

Таблица 2

Коэффициенты престижности в зависимости от планировки

Ранг	Планировка	Коэффициент престижности
1	Ленинградка	180
2	Хрущевка	90
3	Улучшенная	83
4	Новая	60
5	Индивидуальная	0

Таблица 3

Коэффициенты престижности в зависимости от материала стен

Ранг	Материал стен	Коэффициент престижности
1	Кирпич	82
2	Панель	8
3	Монолит	0

Таблица 4

Коэффициенты престижности (КП) для 28 микрорайонов г. Красноярска (1998 г.)

Ранг	Наименование района	КП	Ранг	Наименование района	КП
1	Академгородок	7,68	15	микрорайон Зеленая роща	2,73
2	Центр	7,09	16	просп. Свободный	2,71
3	микрорайон Северный	6,73	17	микрорайон Солнечный	2,43
4	ул. Копылова	6,48	18	Затон	2,41
5	ул. Железнодорожников	6,19	19	микрорайон Покровка	2,29
6	микрорайон Взлетка	6,07	20	ул. Калинина–микрорайон Северо-Западный	2,04
7	Предмостная площадь–к/т «Юбилейный»	5,19	21	микрорайон Пашенный	1,88
8	Студенческий городок	4,79	22	Торговый центр–к/т «Родина»–ТЮЗ	1,42
9	микрорайон Ветлужанка	3,87	23	к/т «Спутник»–маг. «Океан»–маг. «Баджей»	1,28
10	к/т «Космос»	3,54	24	к/т «Енисей»–ст. Енисей	0,93
11	ул. Л. Кецховели	3,49	25	микрорайон Первомайский–Злобино	0,80
12	ул. Красномосковская	3,01	26	КрасТЭЦ	0,25
13	Краевая больница	3,00	27	микрорайон Водников	–1,11
14	Больница скорой медицинской помощи	2,78	28	Черемушки–пос. Энергетиков–пос. Шинников	–1,98

Таблица 5

Коэффициенты престижности (КП) для 28 микрорайонов г. Красноярска (2016 г.)

Ранг	Наименование района	КП	Ранг	Наименование района	КП
1	Академгородок	40,24	15	БСМП	0,05
2	Центр	14,28	16	Краевая больница	–0,34
3	микрорайон Северный	10,45	17	ул. Красномосковская	–1,57
4	Студенческий городок	9,45	18	просп. Свободный	–1,57
5	микрорайон Взлетка	5,64	19	к/т «Енисей»–ст.Енисей	–3,35
6	ул. Копылова	4,99	20	микрорайон Первомайский–Злобино	–4,84
7	ул. Железнодорожников	4,58	21	к/т «Спутник»–маг. «Океан»–маг. «Баджей»	–5,73
8	к/т «Космос»	4,58	22	КрасТЭЦ	–5,97
9	микрорайон Покровка	3,79	23	микрорайон Солнечный	–6,23
10	микрорайон Ветлужанка	2,86	24	Черемушки–пос. Энергетиков–пос. Шинников	–7,06
11	ул. Л. Кецховели	2,55	25	ул. Калинина–микрорайон Северо-западный	–8,11
12	микрорайон Пашенный	1,69	26	Затон	–10,68
13	микрорайон Зеленая роща	1,52	27	Торговый центр–к/т «Родина»–ТЮЗ	–10,68
14	Предмостная площадь–к/т «Юбилейный»	1,49	28	микрорайон Водников	–12,01

Сравнительный анализ показал, что тройка лидеров не изменилась, самыми престижными районами, как и 18 лет назад, остались Академгородок, Центр и микрорайон Северный. Академгородок лишь увеличил свой рейтинг у покупателей жилья, его коэффициент престижности вырос с 7,68 до 40,24. Это говорит о том, что экологическая обстановка в месте проживания горожан является одним из важнейших факторов, учитываемых при покупке квартиры. Напомним, что авторами уже была построена адекватная модель зависимости цены жилого объекта от экологического состояния района:

$$Ц_р = 3{,}27 - 0{,}053 \cdot Э_р - 0{,}1 \cdot Б_ц, \qquad (9)$$

где $Ц_р$ – цена эталонной квартиры в данном районе, тыс. долл. США; $Э_р$ – экологическое состояние района (ИЗА); $Б_ц$ – близость района к центру города, км.

Полученные авторами результаты подтверждают исследования, проведенные специалистами портала Domofond.ru, которые провели опрос горожан и по его результатам составили рейтинг городских районов. Местные жители оценивали, насколько они довольны экологией, чистотой, услугами ЖКХ, соседями, транспортом и другими сферами жизни. Данные исследований приведены в табл. 6 [11].

Таблица 6

Рейтинг районов г. Красноярска

Районы	Экология	Чистота	ЖКХ	Соседи	Условия для детей	Спорт и отдых	Магазины	Транспорт	Безопасность	Стоимость жизни
Октябрьский	1	1	2	1	6	3	7	3	1	1
Железнодорожный	3	4	5	2	2	1	3	4	2	3
Советский	7	2	1	3	1	2	1	6	4	4
Свердловский	2	6	3	5	5	7	4	5	5	2
Центральный	4	3	4	4	7	4	6	7	3	5
Ленинский	6	5	6	6	4	6	5	1	6	6
Кировский	5	7	7	7	3	5	2	2	7	7

Как видно из табл. 6, Октябрьский район является самым чистым в экологическом плане районом, по мнению жителей Красноярска. Справедливости ради нужно сказать, что мнение жителей города далеко не всегда совпадает с реальным состоянием экологии в районах. Так, например, Академгородок принято считать одним из наиболее экологически благоприятных районов Красноярска. Оказывается, это далеко не так. Распространение антропогенных загрязнений посредством воздушных масс подчиняется розе ветров, присущей для каждого района или области. При этом в результате деятельности человека и изменения ландшафта происходят изменения направлений потоков переноса воздушных масс, что не может не сказываться на общей картине распространения загрязнений. Это привело к тому, что Академгородок очень мощно накрывают потоки воздушных выбросов из центральной, наиболее загруженной автотранспортом, наиболее загазованной, части города. И ещё не нужно забывать о том, что эта часть города (Академгородок и Октябрьский район в целом) подвержена аэрозольным выпадениям, которые переносятся к нам из Восточно-Казахстанской области – экологически неблагополучных Усть-Каменогорска, Семипалатинска [12]. Также всегда считалось, что весь Октябрьский район – наиболее благополучный в экологическом отношении, по сравнению с другими районами нашего города. А было это потому, что на его территории нет станций наблюдения за состоянием загрязнения воздуха, соответственно, и данных об этом тоже нет. То, что мониторинг атмосферного воздуха в Октябрьском районе не ведётся, подтверждают и в управлении Роспотребнадзора по Красноярскому краю [12].

Возвращаясь к рис. 1, отметим, что заметно вырос ранг престижности микрорайона Покровка г. Красноярска. Интенсивная застройка Караульной горы продолжается: в Покровском начаты работы на стройплощадках еще одного микрорайона более чем на 9 тыс. жителей. Несмотря на ряд недостатков этого района (например, отсутствие детских садов, школ, парковок), квартиры, расположенные в этом районе, пользуются популярностью у горожан.

Существенно увеличил свою привлекательность и микрорайон Пашенный – современный девятиэтажный район на окраине города, расположенный неподалеку от Енисея. Там появились новые современные жилые комплексы «Белые росы», «Тихие зори» и пр., что повлекло за собой желание у множества горожан приобрести недвижимость в данном районе.

Вырос рейтинг среди жителей Красноярска и у таких микрорайонов, как Зеленая роща и Первомайский. Эти районы пользуются популярностью у семей с детьми. Список самых удобных районов для проживания с детьми опубликовали специалисты портала N1.RU [6]. В результате самым благоприятным для проживания с детьми оказался микрорайон Зеленая Роща. Из 734 квартир, выставленных на продажу, 65 % находятся в шаговой доступности минимум от одного детского сада, школы и детской поликлиники. Далее в списке идут Северо-Западный и Центральный районы (табл. 7) [10].

В целом можно сказать, что г. Красноярск с каждым годом становится все красивее. Быстрыми темпами идет строительство, появляются новые районы, облагораживаются дворы, развивается инфраструктура. Каждый может найти себе жилье в том районе, который считает наиболее удобным и престижным именно для себя.

Рассмотрим влияние атрибутивного признака «микрорайон» на цену квартиры (рис. 2).

Для анализа влияния этого признака введем 24 фиктивных переменных $(d_1, d_2, ..., d_{24})$, так как сам атрибутивный признак принимает 25 различных значений-атрибутов. Получим стандартизированную линейную регрессионную модель:

$$t_{\hat{y}} = -3,79t_{d_1} + 2,45t_{d_2} - 0,81t_{d_3} + 1,33t_{d_4} + 2,51t_{d_5} +$$
$$+1,41t_{d_6} + 2,45t_{d_7} - 6,40t_{d_8} - 1,04t_{d_9} - 2,90t_{d_{10}} +$$
$$+ 0,73t_{d_{11}} - 0,96t_{d_{12}} + 2,95t_{d_{13}} + 4,41t_{d_{14}} + 2,45t_{d_{15}} -$$
$$-2,75t_{d_{16}} - 1,93t_{d_{17}} + 3,09t_{d_{18}} - 4,07t_{d_{19}} - 0,53t_{d_{20}} +$$
$$+ 2,45t_{d_{21}} - 0,81t_{d_{22}} - 1,23t_{d_{23}} + 0,05t_{d_{24}}.$$

В результате расчетов получились коэффициенты «престижности», представленные в табл. 8.

Таблица 7

Рейтинг районов, удобных для проживания с детьми

Микрорайон	Всего предложений	Предложения с насыщенной социальной инфраструктурой для детей	Доля в общем количестве
Зеленая роща	734	475	65
Северо-Западный	220	131	60
Центр	321	172	54
Верхние Черемушки	483	255	53
Предмостная площадь	287	138	48
Северный	812	384	47
Первомайский	595	248	42
Ветлужанка	253	105	42
Торговый центр	250	100	40
Николаевка	221	74	33

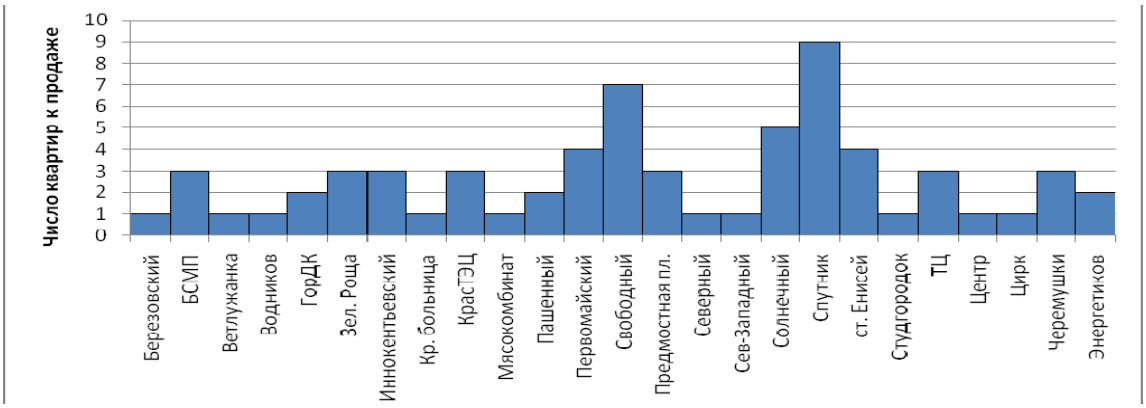


Рис. 2. Число однокомнатных квартир, предложенных к продаже в 2016 г.

Fig. 2. The number of one-room apartments offered for sale in 2016

Таблица 8

Коэффициенты престижности микрорайона в зависимости от количества продаж

Ранг	Микрорайон	Коэффициент престижности	Ранг	Микрорайон	Коэффициент престижности
1	КрасТЭЦ	–6,4	14	Энергетиков	0,1
2	Студгородок	–4,1	15	Первомайский	0,7
3	БСМП	–3,8	16	ГорДК	1,3
4	Пашенный	–2,9	17	Иннокентьевский	1,4
5	Солнечный	–2,8	18	Северо-Западный	2,5
6	Спутник	–1,9	19	Центр	2,5
7	Черемушки	–1,2	20	Ветлужанка	2,5
8	Мясокомбинат	–1,0	21	Краевая больница	2,5
9	Свободный	–1,0	22	Зеленая Роща	2,5
10	Цирк	–0,8	23	Предмостная площадь	2,9
11	Водников	–0,8	24	ст. Енисей	3,1
12	ТЦ	–0,5	25	Северный	4,4
13	Березовский	0,0			

Заключение. Рассчитав коэффициенты престижности для атрибутивных факторов, построим регрессионную модель, содержащую следующие факторы: цена (y), общая площадь (x_1), планировка (x_2), микрорайон (x_3), материал стен (x_4):

$$y = 14,19 + 61,26x_1 - 2,35x_2 + 44,72x_3 - 0,40x_4,$$

с такими статистически значимыми факторами, как общая площадь (x_1), планировка (x_2), микрорайон (x_3). Или в стандартизированной форме:

$$t_{\hat{y}} = 61,74t_{x_1} - 2,35t_{x_2} + 44,59t_{x_3} - 0,40t_{x_4},$$

что подтверждает высокое влияние на цену квартиры, предлагаемой к продаже, общей площади и микрорайона, а также умеренное влияние планировки. Результаты работы могут быть использованы для оценки стоимости земельных участков [13–15].

Библиографические ссылки

1. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Грошак Е. В. Моделирование стоимости жилья в г. Красноярске : монография / СибГТУ. Красноярск, 2007. 204 с.

2. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Вайтекунене Е. Л. Эконометрическое моделирование стоимости жилья в Красноярске : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. 178 с.

3. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Сурнина Е. В. Информационная система оценки стоимости квартир на вторичном рынке жилья как инструмент управления инвестициями // Вестник СибГАУ. 2009. № 4(25), ч. 1. С. 219–223.

4. Cost estimation of information system of apartments at secondary housing markets as a management investment tool / С. И. Сенашов [et al.] // Вестник СибГАУ. 2009. № 5(26). С. 154–157.

5. Актуальное моделирование недвижимости в Красноярске / С. И. Сенашов [др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 86–91.

6. Денисенко И. К., Сенашов С. И., Юферова Н. Ю. Моделирование стоимости жилья в Красноярске // Вестник СибГТУ. 2000. № 1. С. 185–190.

7. Мхитарян Н., Кабаева Е. В. Анализ рынка недвижимости в Москве // Вопросы статистики. 1999. № 3. С. 32–34.

8. Свид. 2017621158 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации базы данных. Квартиры Красноярска 2016 / О. А. Медведева, И. Л. Савостьянова, С. И. Сенашов, И. В. Томаровская, О. П. Сорокина; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО СибГАУ (RU). № 2017621158 ; заявл. 2017 ; опубл. 2017, Реестр баз данных. 1 с.

9. Назван самый удобный район Красноярска для проживания с детьми [Электронный ресурс]. URL: http://krsk.sibnovosti.ru/society/335954-nazvan-samyy-udobnyy-rayon-krasnoyarska-dlya-prozhivaniya-s-detmi (дата обращения: 05.11.2017).

10. Престижность районов города [Электронный ресурс]. URL: http://www.ray-on.ru/?st=1&id=11 (дата обращения: 05.11.2017).

11. Рейтинг районов – Красноярск [Электронный ресурс]. URL: www.domofond.ru/city-ratings/krasnoyarsk-c3174 (дата обращения: 31.10.2017).

12. Состояние окружающей среды в Красноярске. Какие районы нашего города наиболее экологически благополучные. И есть ли такие вообще? [Электронный ресурс]. URL: www.krsk.kp.ru/daily/25824.3/2801084/ (дата обращения: 01.11.2017).

13. Simulation of the cost of residential properties in Krasnoyarsk for 2013–2014 / С. И. Сенашов [и др.]. // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 830–836.

14. Методы оценки земельных участков / С. И. Сенашов [и др.] // Решетневские чтения. 2009. Т. 2, № 13. С. 549–650.

15. Сурнина Е. В., Сенашов С. И. Использование ГИС-технологий для оценки стоимости квартир // актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. Т. 1, № 6. С. 444–445.

References

1. Senashov S. I., Yuferova N. Yu., Groshak E. V. *Modelirovanie stoimosti zhil'ya v g. Krasnoyarske* [Simulation of the cost of residential property in the city of Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, izd-vo SibGTU Publ., 2007, 204 p.

2. Senashov S. I., Yuferova N. Yu., Vaytekunene E. L. *Ekonometricheskoe modelirovanie stoimosti zhil'ya v Krasnoyarske* [Econometric modelling of residential property cost in Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 178 p. (In Russ.).

3. Senashov S. I., Juferova N. Yu., Surnina E. V. [Information system of valuation of apartments on the secondary market as a tool for investment management]. *Vestnik SibGAU.* 2009, No. 4 (25), P. 219–223 (In Russ.).

4. Senashov S. I. at al. [Cost estimation of information system of apartments at secondary housing markets as a management investment tool]. *Vestnik SibGAU.* 2009, No. 5(26), P. 154–157 (In Russ.).

5. Medvedeva O. A., Savostyanova I. L., Senashov S. I., Tomarovskaya I. V., Sorokina O. P. *Kvartiry Krasnoyarska 2016* [Flats of Krasnoyarsk 2016]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2017621158.

6. Senashov S. I. [Real-life simulation of real estate in Krasnoyarsk]. *Vestnik SibGAU.* 2013, No. 2 (48), P. 86–91 (In Russ.).

7. Denisenko I. K., Senashov S. I., Juferova N. Yu. [Modeling the cost of housing in Krasnoyarsk]. *Vestnik Sib. gos. tehnologich. un-ta*. 2000, No. 1, P. 185–190 (In Russ.).

8. Mhitaryan N., Kabaeva E. V. [The analysis of the real estate market in Moscow]. *Voprosy statistici.* 1999, No. 3, P. 32–34 (In Russ.).

9. *Nazvan samyy udobnyy rayon Krasnojarska dlja prozhivaniya s det'mi* [The most convenient area of Krasnoyarsk for children] (In Russ.). Available at: http:// http://krsk.sibnovosti.ru/society/335954-nazvan-samyy-udobnyy-rayon-krasnoyarska-dlya-prozhivaniya-s-detmi (accessed 05.11.2017).

10. *Prestizhnost' rayonov goroda* [The prestige areas of the city] (In Russ.). Available at: http:// www.ray-on.ru/?st=1&id=11 (accessed 05.11.2017).

11. *Reyting rayonov – Krasnoyarsk* [The rating areas – Krasnoyarsk] (In Russ.). Available at: http:// www.domofond.ru/city-ratings/krasnoyarsk-c3174 (accessed 31.10.2017).

12. *Sostoyanie okruzhayushchey sredy v Krasnoyarske. Kakie rayony nashego goroda naibolee ekologicheski-blagopoluchnye. I est' li takie voobshche?* [The state of the environment in Krasnoyarsk. What areas of our city's most ecologically prosperous. And is there some?] (In Russ.). Available at: http:// www.krsk.kp.ru/daily/25824.3/2801084/ (accessed 01.11.2017).

13. Senashov S. I., Savostyanova I. L., Yuzaeva A. G., Savchenko L. M. [Simulation of the cost of residential properties in Krasnoyarsk for 2013–2014]. *Vestnik SibGAU.* 2016, Vol. 17, No. 3, P. 830–836.

14. Senashov S. I., Surnina E. V., Puzanova G. A., Filyushina E. V. [Methods of valuation of land] *Reshetnevskie chteniya.* 2009, Vol. 2, No. 13, P. 549–650 (In Russ.).

15. Surnina E. V., Senashov S. I. [The use of GIS technology for estimation of cost of apartments]. *Aktualnye problemy aviacii i kosmonavtiki.* 2010, Vol. 1, No. 6, P. 444–445 (In Russ.).

© Пашковская О. В., Сенашов С. И.,
Савостьянова И. Л., Юферова Н. Ю., 2017

UDC 004.932.2

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 796–803

VIDEO BASED FLAME DETECTION ALGORITHM

A. V. Pyataeva*, O. E. Bandeev

Siberian Federal University, Institute of Space and Informatics Technologies
26, Academica Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
*E-mail: anna4u@list.ru

Video based flame detection from a surveillance camera offers early warning to ensure prompt reaction to devastating fire hazards. Many existing fire detection methods based on computer vision technology have achieved high detection rates, but often with unacceptably high false-alarm rates. This paper presents an automatic flame detection method using computer vision and pattern recognition techniques. This method uses the features of fire, such as the moving parameters, chromatic components, and geometrical (flickering) features.

For experimental researches the databases of Bilkent University and Dyntex database were used. The developed method of flame detection on video provides 89.5–98.2 % of accuracy for flame sequences. The number of frames of test video sequences was 6.853, the total duration of the videos is 5 minutes. Experimental results show that the proposed method is feasible and effective for video based flame detection.

Keywords: flame detection, flame features, fire, video sequence.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 796–803

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ВИДЕОДАННЫМ

А. В. Пятаева*, О. Е. Бандеев

Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26
*E-mail: anna4u@list.ru

Наличие камер видеонаблюдения, в настоящее время установленных и устанавливаемых на городских территориях, на территориях предприятий, а также на территориях природных парков и лесных массивов, позволяет выполнить мониторинг возгораний на ранних стадиях пожара. Обнаружение пламени по видеоданным является актуальной задачей, поскольку позволяет своевременно ликвидировать источник возгорания, тем самым избежать возможных экономических потерь и даже человеческих жертв. Для обнаружения пламени предложен алгоритм, основанный на выделении движения, учете цветовых особенностей пламени и анализе его динамических свойств. Для проведения экспериментальных исследований использованы базы данных видеопоследовательностей Билькентского университета и Dyntex. Количество кадров тестовых видеопоследовательностей составило 6 853, общая продолжительность роликов – 5 мин. Средняя по всем видеороликам точность обнаружения пламени составила 94,47 %, что является хорошим результатом и подтверждает эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: обнаружение пламени, огонь, видеопоследовательность, пожар, признаки огня.

Introduction. In open spaces, a visual detection of fire has advantage over traditional methods, such as sampling methods of air particles or ambient temperature measurements. Application of methods based on ultraviolet or infra-red multi-spectral principles for flame detection generally requires substantial material costs.

Flame detection on video increases the likelihood of early fire detection and reduces the response time to ignition, since in the case of video analyses detection of fire is carried out in the initial phase. In addition, flame detection on video based data gives a precise location of a fire hazard. The use of the additional flame detection module in video surveillance systems will expand their scope and improve fire safety of the sites. This will help to prevent possible losses and significantly reduce the damage caused by ignition. With the development of video surveillance systems and image analysis technologies, it has become possible to use the data to detect flames as reliable sign of fire.

Signs of flame on video. Flame has many different characteristics, such as colour, motion, shape and extent, behaviour, etc. Various processes in the flame are very rapid, so it is often impossible to see them with the naked eye.

The colour of the flame depends on many factors. First, it could be the chemical composition of a burning

object, which may change the shades of the flame under combustion. Secondly, air saturation with various gases, for example oxygen, has a great impact. The colour of the flame may also be influenced by its temperature [1].

The second equally important characteristic for flames detection via video sequences is its dynamics, or movement. It is well known that burning of fire is a very dynamic process. Flames regularly change their shape and direction, so such processes can be easily detected. In the video image flame and smoke are represented as a dynamic 2d texture [2]. Such dynamic textures may have a stochastic and regular component [3].

As a way of classifying the selected smoke areas into "flames" and "no flames", such approaches as fuzzy logic, production systems, support vector machine (SVM), artificial neural networks (neuro-nets), groups of trees and other solutions are used.

Thus, the signs of fire in the video can be attributed to [4–6]: movement, colour, change of borders, flickering on the edges and glowing flames. Among the methods of detecting flames via the video sequences, it is possible to specify approaches based on stochastic models and other mathematical methods, methods based on traffic allocation and chromaticity.

Video-based flame detection methods. So far, there are many different methods of flame detection based on video sequences.

Most of them use characteristics on the basis of motion cues and finding pixels corresponding to the colour of the flame. Since flame zones are characterized by flickering ability [7], which is to change the boundaries from frame to frame randomly, the flickering rate is 10 Hz [8]; to assess the energy components of an image on the boundary of the candidate zone frequency methods of image analysis are used.

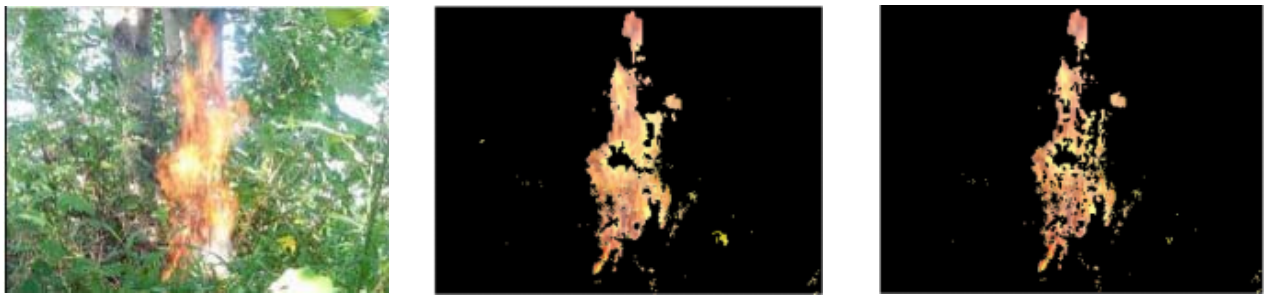
Thus, in the present work [5] a two-phase filtering system, which consists of a high frequency and a low-frequency filter, is used. In the research [9] stochastic model is employed to simulate the spatial and temporal characteristics of zones: hidden Markov models, which are trained by a test set of images containing smoke and flames, are applied. To detect flames via video sequences, a sequential image of the flame is processed [10], starting with a low-level representation based on pixels and ending with a high-level semantic representation of the video. Each pixel of a particular image that matches certain colour rules and motion characteristics is marked as a "pixel of the flame colour". Following that, the candidate region of the flame-like pixels is roughly formed, and the image is divided into separate units. The units are formed using specially trained dictionaries which can identify and recognize marked pixels, for more accurate segmentation of candidate regions with projected flame, and to exclude "no flame" zones, as shown in fig. 1.

Another method of flame detection via video sequences is based on the idea of processing the foreground of images and optical flow techniques [11]. Images are accumulated by processing the foreground of images which are extracted using a differentiated personnel method.

Two options are used to differentiate the candidate regions of the flame from the smoke candidate regions. Flame zones are recognized via statistical model built on the accumulation of foreground images, while the smoke zones are calculated using the optical flow and the model of the motion function. Flame burning is seen as a turbulent movement with some source. If there is no wind or air flow, the zones of continuous flame and intermittent zones of flame will be repeated at regular intervals in a given zone. Thus, the importance of flame region pixels in the foreground of the image is growing.

Flame detection on video sequences is also possible using logistic regression and temporary smoothing [12]. Since the colour of the lamp is usually heavily saturated in the red band, the red components of each fire pixel is more common than others in the RGB colour space. Due to RGB colour values are sensitive to light changes, the RGB ink colour is transformed into a colour space that can distinguish between brightness and colour. The YCbCr colour space describes the colour as bright (Y) and coloured (Cb, Cr) components. The background pixels show different shapes as well as different location of the colour factor in the distribution (fig. 2).

Thus, because of similarities in colour, fire flames and fire-like objects show similarities in terms of distribution, but with different average values along the axis of the colour coefficient.



a *b* *c*

Fig. 1. Image processing when flames are detected:
a – initial video image; *b* - detecting the pixels of the flame colour; *c* - pixel movement processing

Рис. 1. Обработка изображения при обнаружении пламени:
а – исходное видеоизображение; *б* – выделение пикселей цвета пламени; *в* – обработка движения пикселей

Video-based flame detection algorithm. In this work, the task flames detection on video sequences is solved as follows.

1. The video sequence in silent mode is broken into a series of video images based on 24 frames per second.

2. The resulting video is searched for a motion to separate the background zones from the flame candidate zones. To do this, the Background Subtractor of the computer Vision Library OpenCV [13] is used. Background model function is based on the algorithm of Gaussian distributions mixture. The model of Gaussian mixtures is the weighed sum of M component and can be written as:

$$p\left(\bar{x}\,|\lambda\right) = \sum_{i=1}^{M} p_i b_i\left(\bar{x}\right), \quad (1)$$

where x – D-dimensional vector of random values; $b_i(x)$ – density of distribution of the constituent parts of the model; p_i, i = 1, ..., M, – weights of model components. Parameter λ is calculated according to the formula:

$$\lambda = \left\{ p_i, \overline{\mu_i}, \sum_{i=1}^{M} p_i b_i\left(\bar{x}\right) \right\}. \quad (2)$$

Each component is a D-dimensional Gaussian distribution function. After the movement is found, axes x and y have the most extreme detected pixels, and their coordinates draw a rectangle that separates the flame zone.

3. In the zones where movement is identified, the colour mask of the flame is placed. A combination of RGB and HSV colour spaces is used to highlight zones of flame colour:

$$R > G \geq B, \quad (3)$$

$$R > RT, \quad (4)$$

$$S \geq (255 - R) \times ST / RT. \quad (5)$$

In Expressions (4) to (5), RT indicates the threshold value of R; S is the value of the pixel saturation, and ST corresponds to the saturation when R value matches the knowledge of RT parameter for the same pixel. Rules (3) and (4) show that the value of the R channel is greater than of the other objects.

4. Analysis of the dynamic properties of flame (fig. 3) is performed by checking the size of the rectangular unit. Change to the unit size from the current and previous frames is taken into account:

$$sd = s1/s2, \quad (6)$$

where $s1$ is the size of the candidate unit of the previous frame, $s2$ is the unit size of the current frame.

5. Flame geometry resulting from the formation of ions while combustion is taken into account in the following manner:

$$circularity = s \times (4\pi \times s/P^2), \quad (7)$$

$$squareness = s / (x \times y), \quad (8)$$

$$aspectRatio = \mathrm{s} \times (\min(x, y)/\max(x, y)), \quad (9)$$

$$roughness = s*(P1/P), \quad (10)$$

where, s is the area of the candidate zone, P is the perimeter of the candidate zone, x and y – the width and height of the candidate zone, $P1$ is the perimeter of the image.

6. The frame rate of the source video is also checked against the frame rate of the selected zones:

$$fr = FPS/MAXS*C, \quad (11)$$

where, $MAXS$ is the maximum unit size among all frames in the video sequence, C is the number of changes to the maximum unit size, FPS is the frame rate of the sequence. By comparing the frame rate and the frequency of the candidate zone unit, you can confirm the presence of motion on the video sequence, since each change represents a flame shift. The algorithm flow-chart is presented in fig. 4.

After completing steps 1–6 of the algorithm, the candidate region is assigned to one of the classes; “flame” or “no flame”. To do this, the classification method “ reference vector machine” (SVM) is used.

Experimental studies. A series of Bilkent [14] and Dyntex [15] video consequences are used for the pilot studies. The frames used for the videos and their properties are shown in tab.1. The total selection of video images includes 4.031 examples of flames and 2.822 samples with no flames, and the total length of videos is about 5 minutes. The training selection equals 80 %, the test selection – 20 % of the total sample.

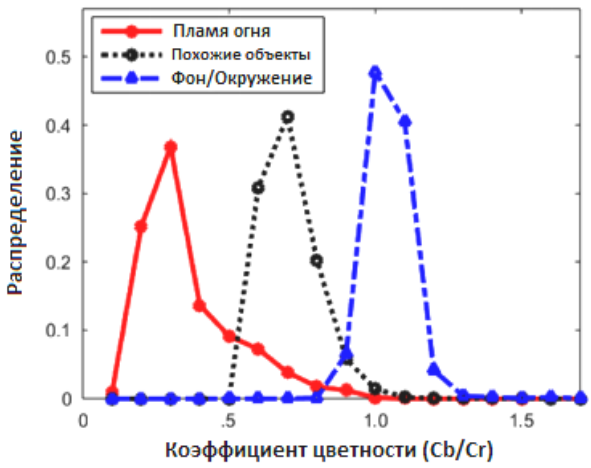
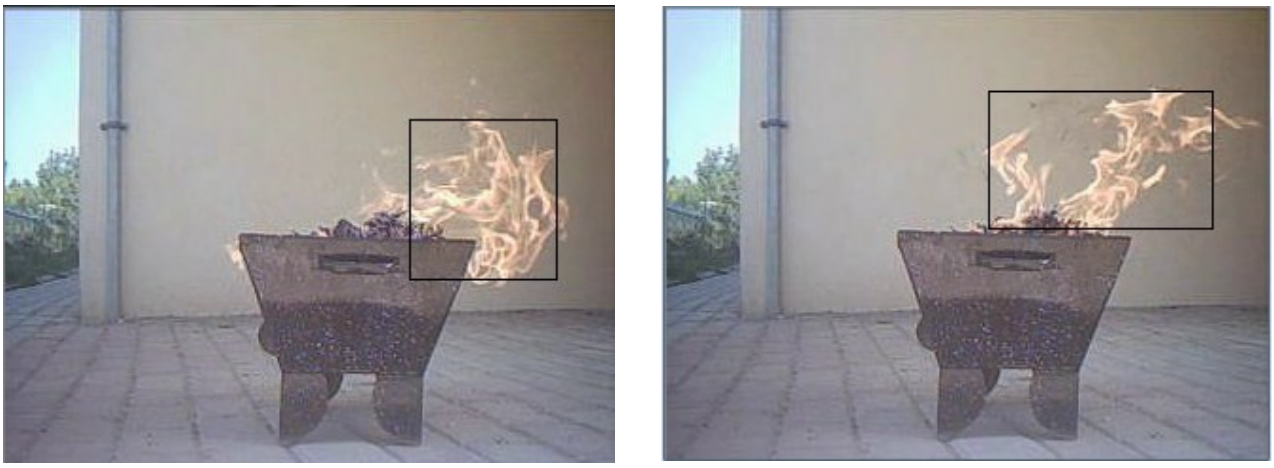


Fig. 2. Colour factor distribution

Рис. 2. Распределение коэффициента цветности



a *b*

Fig. 3. Size of the unit change: *a* – previous frame; *b* – current frame

Рис. 3. Изменение размера блока: *а* – предыдущий кадр; *б* – текущий кадр

Fig. 4. Flow chart of the flame detection algorithm via video data

Рис. 4. Блок-схема алгоритма обнаружения пламени по видеоданным

Results of the pilot studies are shown in tabl. 2 and 3. The performance of the flame detection algorithm was evaluated using the *TR*-true recognition and *FAR*-false alert rejection. The *TR* indicator is calculated as a ratio of frames in which the flame is correctly detected to the frames where the flame is skipped. The *FAR*-false operation indicates the ratio of frames with false positive operation to the total number of frames on the video sequence.

As an example, fig. 5 and 6 present the frames of the flame detection in the Bilkent\barbeq.avi and Bilkent\ ForestFire1.avi video sequence, which show initial video image, highlighted colour mask (colour and motion), geometry of flame and flickering, result of the algorithm operation.

Conclusion. The work suggests the algorithm to detect fire zones on video sequences. The algorithm is based on motion analysis, dynamic properties, and flame colour. The average detection accuracy of 94.47 % was carried out in experimental studies on video sequence containing flames, which is a good result as the flame was skipped in only 247 frames out of 4.031. False alert rejection, which were investigated on a video sequence experiment without flame, was obtained in 29 out of the 2.822, averaging 1.37 per cent. Thus, the experiment results confirm the efficiency of the proposed algorithm for the flame detection via on video sequences.

Table 1

Test video sequences frames

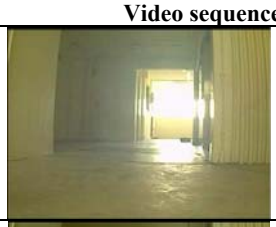
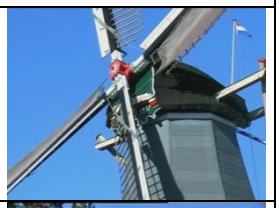
Test sequence description	Frame sample	Test sequence description	Frame sample
Video sequences with flame			
Bilkent\fBackYardFile, frame 334 Resolution, Pixels: 320x240 Number of frames: 1.251		Bilkent\barbeq.avi, frame 186 Resolution, Pixels: 320x240 Number of frames: 516	
Bilkent\forest4.avi, frame 113 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 251		Bilkent\forest5.avi, frame 45 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 246	
Bilkent\ForestFire1.avi, frame 54 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 247		Bilkent\fire1.avi, frame 146 Resolution, Pixels: 320x240 Number of frames: 542	
Bilkent\forest2.avi, frame 154 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 273		Bilkent\controlled1.avi, frame 67 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 275	
Dyntex/66ammj00.avi, frame 158 Resolution, Pixels: 720x576 Number of frames: 227		Dyntex/64cac10.avi, frame 104 Resolution, Pixels: 720x576 Number of frames: 203	
Video sequences without flame			
Bilkent\ sEmptyR1.avi, frame 134 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 458		Dyntex/648ab10, frame 1 Resolution, Pixels: 384×288 Number of frames: 716	
Bilkent\ sEmptyR2.avi, frame 5 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 437		Bilkent\ sParkingLot.avi, frame 563 Resolution, Pixels: 400x256 Number of frames: 1.136	
Dyntex/649h320.avi, frame 120 Resolution, Pixels: 720x576 Number of frames: 206		Dyntex/6489610.avi, frame 47 Resolution, Pixels: 720x576 Number of frames: 201	

Table 2

Flame detection results (video sequences with flame)

Video sequence	Total Number of frames	Number of frames with true flame detection	*TR*, %	*FAR*, %
Bilkent\fBackYardFile.avi	1251	1127	90.09	9.91
Bilkent\barbeq.avi	516	507	98.26	1.74
Bilkent\forest4.avi	251	235	93.63	6.37
Bilkent\forest5.avi	246	234	95.12	4.88
Bilkent\ForestFire1.avi	247	240	97.17	2.83
Bilkent\fire1.avi	542	529	97.60	2.40
Bilkent\forest2.avi	273	264	96.70	3.30
Bilkent\controlled1.avi	275	246	89.45	10.55
Dyntex\6ammj00.avi	227	217	95.59	4.41
Dyntex\64cac10.avi	203	185	91.13	8.87
Average values	–	–	94.47	5.53

Table 3

Flame detection results (video sequences without flame)

Video sequence	Total Number of frames	Number of frames with false flame detection	*FAR*, %
Bilkent\sEmptyR1.avi	458	3	0.65
Bilkent\sEmptyR2.avi	437	12	2.74
Bilkent\sParkinLot.avi	1136	5	0.44
Dyntex\648ab10.avi	384	6	1.56
Dyntex\6489610.avi	201	1	0.49
Dyntex\649h320.avi	206	2	0.97
Average value	–	–	1.37

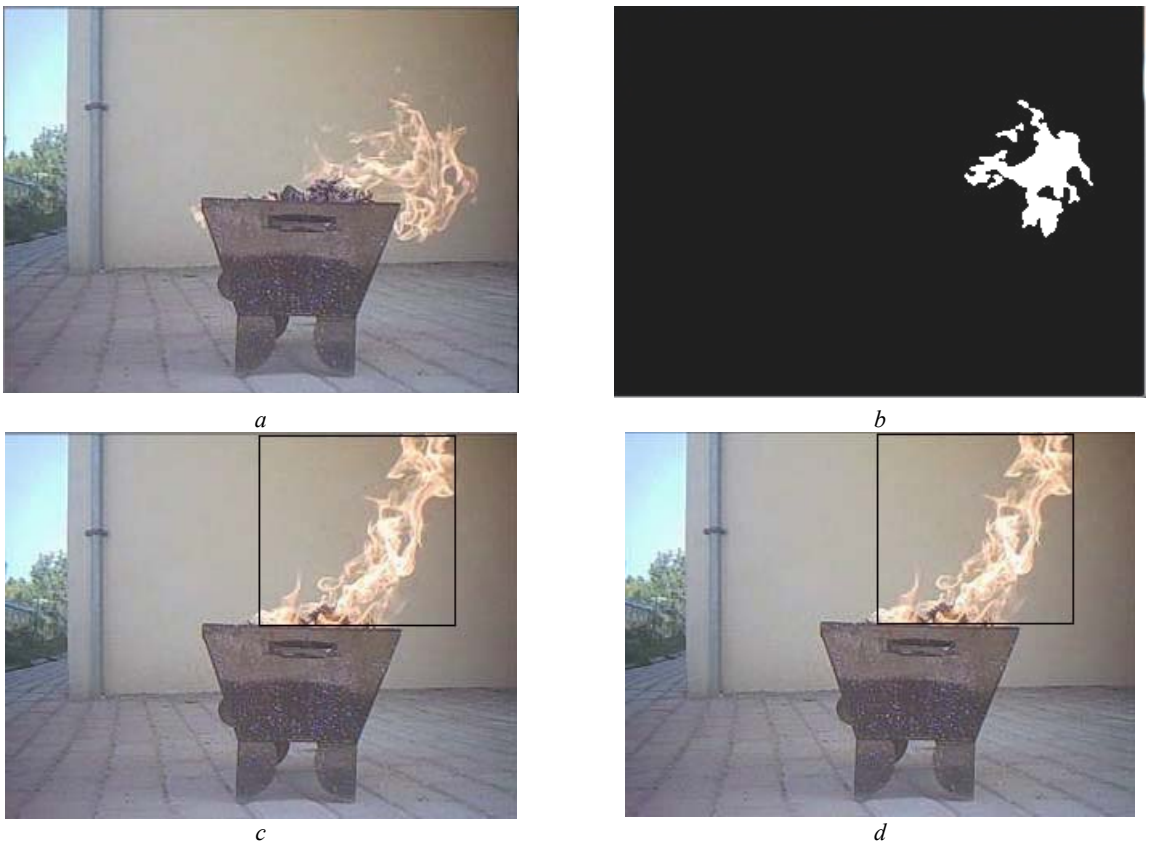


Fig. 5. Fire detection algorithm steps. Video sequence Bilkent\barbeq.avi:
a – initial frame; *b* – flame mask; *c* – geometry and flickering; *d* – algorithm operation result

Рис. 5. Шаги алгоритма обнаружения пламени. Видеопоследовательность Bilkent\barbeq.avi:
а – исходный кадр; *б* – маска пламени; *в* – учет геометрии и мерцания; *г* – результат работы алгоритма

Fig. 6. Fire detection algorithm steps. Video sequence Bilkent\ForestFire1.avi.:
a – initial frame; *b* – flame mask; *c* – geometry and flickering; *d* – algorithm operation result

Рис. 6. Шаги обнаружения пламени. Видеопоследовательность Bilkent\ForestFire1.avi.:
а – исходный кадр; *б* – маска пламени; *в* – учет геометрии и мерцания; *г* – результат работы алгоритма

References

1. Spichkin Y. V., Kalach A. V., Sorokina Y. N. [To a guestion of features of emergence and development of desperse matarials burning]. *Vestnik voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii.* 2014, Vol. 3(12), P. 7–12 (In Russ.).

2. Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A. Spatio-temporal smoke clustering in outdoor scenes based on boosted random forests. *Procedia Computer Science*. 2016, Vol. 96, P. 762–771.

3. Goncalves W. N. at al. A complex network approach for dynamic texture recognition. *Neurocomputing.* 2015, Vol. 153, P. 211–220.

4. Bogush R. P., Tychko D. A. Algorithm for complex smoke and flame detection based on video surveillance systems data analysis. *Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya*. 2015, P. 65–71.

5. Brovko N. V., Bogush R. P. The analysis of vision-based methods for earle fire detection. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011, No. 12, P. 42–50 (In Russ.).

6. Han D., Lee B. Flame and Smoke Detection Method for Early Real-Time Detection of a Tunnel Fire. *Fire Safety Journal*. 2009, Vol. 44 (7), P. 951–961.

7. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Gueduekbay U. Computer vision based method for real-time fire and flame detection. *Pattern Recognition Letters*. 2006, Vol. 27, No. 1, P. 49–58.

8. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Cetin A. E. Wavelet based real-time smoke detection in video. *Signal Processing: Image Communication*. 2005, Vol. 20, P. 255–260.

9. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Cetin A. E. Contour based smoke detection in video using wavelets. *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO – 2006)*. 2006, P. 1–5.

10. Yaqin Z., Guizhong T., Mingming X. Hierarchical detection of wildfire flame video from pixel level to semantic level. *Expert Systems with Applications*. 2015, Vol. 42, Iss. 8, P. 4097–4104.

11. Chunyu Y., Zhibin M., Xi Zh. A Real-time Video Fire Flame and Smoke Detection Algorithm. *Procedia Engineering.* 2013, Vol. 62, P. 891–898.

12. Seong G. K., Donglin J., Shengzhe L., Hakil K. Fast flame detection in surveillance video using logistic regression and temporal smoothing. *Fire Safety Journal.* 2016, Vol. 79, P. 37–43.

13. Open Source Computer Vision Library. Available at: http://opencv.org/ (accessed 09.10.2017).

14. Bilkent database. Available at: http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/FireClips/ (accessed 09.10.2017).

15. Renaud P., Fazekas S., Huiskes M. J. DynTex: A comprehensive database of dynamic textures. *Pattern Recognition Letters*. 2010, Vol. 31, No. 12, P. 1627–1632.

Библиографические ссылки

1. Спичкин Ю. В., Калач А. В., Сорокина Ю. Н. К вопросу об особенностях возникновения и развития горения дисперсных материалов // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2014. Вып. 3 (12) С. 7–12.

2. Favorskaya M., Pyataeva A., Popov A. Spatio-temporal smoke clustering in outdoor scenes based on boosted random forests // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 96. P. 762–771.

3. Goncalves W. N., Machado B. B., Bruno O. M. A complex network approach for dynamic texture recognition // Neurocomputing. 2015. Vol. 153. P. 211–220.

4. Богуш Р. П., Тычко Д. А. Алгоритм комплексного обнаружения дыма и пламени на основе анализа данных систем видеонаблюдения // Техническое зрение в системах управления. М., 2015. С. 65–71.

5. Бровко Н. В., Богуш Р. П. Анализ методов обработки последовательностей видеоизображений в приложении к задаче раннего обнаружения пожаров // Вестник Полоцкого государственного университета. 2011. № 12. С. 42–50.

6. Han D., Lee B. Flame and Smoke Detection Method for Early Real-Time Detection of a Tunnel Fire // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44 (7). P. 951–961.

7. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Gueduekbay U. Computer vision based method for real-time fire and flame detection // Pattern Recognition Letters. 2006. Vol. 27, No. 1. P. 49–58.

8. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Cetin A. E. Wavelet based real-time smoke detection in video // Signal Processing: Image Communication, EURASIP. 2005. Vol. 20. P. 255–260.

9. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Cetin A. E. Contour based smoke detection in video using wavelets // 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO – 2006). Italy, 2006. P. 1–5.

10. Yaqin Z., Guizhong T., Mingming X. Hierarchical detection of wildfire flame video from pixel level to semantic level // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42, iss. 8. P. 4097–4104.

11. Chunyu Y., Zhibin M., Xi Zh. A Real-time Video Fire Flame and Smoke Detection Algorithm // Procedia Engineering. 2013. Vol. 62. P. 891–898.

12. Fast flame detection in surveillance video using logistic regression and temporal smoothing / G. K. Seong [et al.] // Fire Safety Journal. 2016. Vol. 79. P. 37–43.

13. Open Source Computer Vision Library [Электронный ресурс]. URL: http://opencv.org/. (дата обращения: 09.10.2017).

14. Bilkent database [Электронный ресурс]. URL: http://signal.ee.bilkent.edu.tr/ VisiFire/Demo/FireClips/ (дата обращения: 09.10.2017).

15. Renaud P., Fazekas S., Huiskes M. J. DynTex: A comprehensive database of dynamic textures // Pattern Recognition Letters. 2010. Vol. 31, No. 12. P. 1627–1632.

© Pyataeva A. V., Bandeev O. E., 2017

UDC 62.501

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 804–809

COMPARATIVE ANALYSIS OF TYPICAL REGULATION ALGORITHMS AND NONPARAMETRIC DUAL CONTROL ALGORITHM

A. V. Raskina

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: raskina.1012@gmail.com

The task of nonparametric dual control algorithm and standard regulation laws (P-, PI-, PID-regulators) at dynamic objects with discrete-continuous nature of the technological process control is considered. It means that in itself, the dynamic process is continuous, however, the "input-output" variables of the process are controlled through discrete instants. In the case under study, the structure of the process model is partially parametrized. It means that equation order is determined from prior information, but at the same time functional dependency between "input-output" variables of the process remains unknown. The methods of dynamic processes modeling and control based on nonparametric algorithms are offered. The complexity of dynamic process modeling and control under condition of incomplete information is discussed. This level of prior information is characterised by the lack of model structure knowledge, but the information on object qualitative characteristics, for example, unambiguity, or ambiguity characteristics, linearity for dynamic processes or the nature of its nonlinearity is required. Methods of nonparametric statistics are applied to identification problem solving at this level of prior information. The problems of identification and control in the conditions of incomplete information are very relevant because many dynamic processes are not deeply studied and the presence of unknown distribution random noises causes more complexity in solving the identification and control tasks. The results of computing experiment which show the efficiency of nonparametric dual control algorithm in comparison with standard regulators are presented .

Keywords: dynamic process, nonparametric dual control, adaptive systems, standart regulators.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 804–809

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТИПОВЫХ АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ С НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ ДУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. В. Раскина

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: raskina.1012@gmail.com

Рассматривается задача применения непараметрического дуального алгоритма управления и стандартных законов регулирования (П-, ПИ-, ПИД-регуляторы) при управлении динамическими объектами с дискретно-непрерывным характером технологического процесса. Это означает, что сам по себе динамический процесс является непрерывным, однако входные-выходные переменные процесса контролируются через дискретные моменты времени. В рассматриваемом случае структура модели процесса частично параметризована. Это означает, что из априорной информации известен порядок управления, но при этом функциональная зависимость между входными-выходными переменными процесса остается неизвестной. Предложены методы моделирования и управления динамическими процессами, основанные на непараметрических алгоритмах. Обсуждается сложность моделирования и управления динамическим процессом при условии неполной информации. Для данного уровня априорной информации характерно отсутствие знаний о структуре модели, но требуется наличие информации о качественных характеристиках объекта, например, однозначность либо неоднозначность его характеристик, линейность для динамических процессов либо характер его нелинейности. Для решения задач идентификации на этом уровне априорной информации применяются методы непараметрической статистики. Проблемы идентификации и управления в условиях недостатка априорной информации являются актуальными, поскольку многие динамические процессы не изучены глубоко, а наличие случайных помех с неизвестным законом распределения вызывает еще большую сложность при решении задач идентификации и управления. Представлены результаты компьютерного эксперимента, которые показывают эффективность непараметрического алгоритма дуального управления по сравнению со стандартными регуляторами.

Ключевые слова: динамический процесс, непараметрическое дуальное управление, адаптивные системы, стандартные регуляторы.

Introduction. At present, widespread types of various control processes regulators are control devices based on the use of standard control laws (P, PI, PID regulators and their versions). It should be noted that when using these systems, the quality of control is not sufficiently effective. It should be noted that in some cases the quality of control when using similar systems is insufficiently effective. This is basically due to two main factors. First, the typical regulators use the information about the deviation of the output quantity from the control action when generating control actions. In this case, the data on uncontrolled input influences, which also affect the process output, are often not taken into account. Secondly, the standard regulators are not training and adaptive. This means that when the object is transferred from one control action to another, the regulator will not improve performance. This significantly increases the time of overshooting, and consequently, increases the possibility of going beyond the limits of the technological regulations. In this regard, the issue of developing new control systems to solve these problems is topical. One of the possible ways of solving the control problem is the use of dual control algorithms [1–4]. This article is devoted to the question of comparing the efficiency of using two methods in the control of a dynamic system.

The control device designing. The control system consist of two main elements: a controlled object and a regulator (control unit) – a device that performs the functions object control. The simplest functional control structure is shown in fig. 1 [5].

In fig. 1, the following notations are accepted: $u(t)$ is the input control action, $x(t)$ is the output control action, $x^*(t)$ is the setting action (the desired output).

Let us introduce the object A operator, which describes the process, that is: $x(t) = A < u(t) >$. If there exists an operator inverse to A, that is A^{-1}, when $A^{-1}A = 1$ is the unit operator, then:

$$A^{-1}x(t) = A^{-1}A < u(t) >, \qquad u(t) = A^{-1}x(t). \tag{1}$$

Setting the trajectory $x(t) = x^*(t)$, the ideal value $u^*(t)$ is found from (1). Thus (1) can be referred to the category of ideal regulators. However, the problem is that the operator A is unknown. Also, when constructing a control system, it is necessary to take into account that equality of the setting and the output actions is almost impossible to achieve. This is due to the presence of various noise in the system, inaccuracy of the inverse operator restitution and others. Therefore, it is necessary to introduce the feedback, which modifies control actions during the process (fig. 2).

Depending on the system characteristics and the amount of a priori and current information, one or another control scheme is selected. Today, there are many methods used to solve the control problem. Further, we will consider two approaches to be compared in this article.

Typical control algorithms. One of the most widespread regulators in practice are standard P-, PI- and PID-regulators. Typical regulators are classical in the theory of automatic control. The controller parameters can be set either manually or automatically. The setup process has two main steps: the identification of the controlled object model and the setting of the optimum parameters of the regulator. Before choosing the initial approximation of parameters, it is necessary to determine the purpose of control and the used criteria of quality [5].

Among the tasks for which solution regulators of various types including P-, PI-, PID-regulators are used, the tasks of a defined value parameter maintaining, a problem of program control and others are met. Let the task of tracking be set, that is, the desired trajectory $x^*(t)$ is provided to the input of the object. All standard regulators assume feedback. The P-regulator generates control effect proportional to the error value: $\varepsilon = x - x^*$ with a proportionality coefficient K_1. The I-regulator generates control effect proportional to the integral of the error with a proportionality coefficient. PI-regulator is a combination of P and I regulators, the result of their serial connection. D-regulator generates control actions proportional to the derivative, the controlled variable with the proportionality coefficient. The PID regulator is a combination of all three regulators.

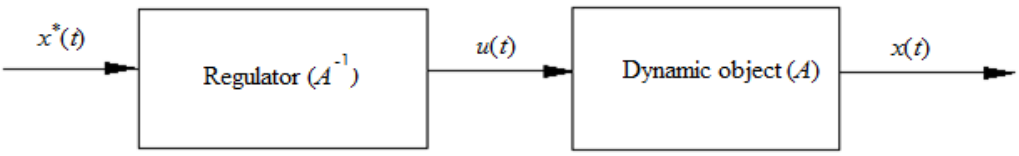


Fig. 1. Control system without feedback

Рис. 1. Разомкнутая прямая схема управления

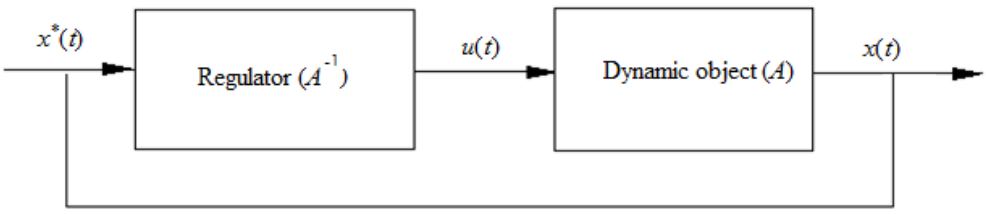


Fig. 2. Control scheme with feedback

Рис. 2. Схема управления с обратной связью

It is clear that the quality of regulation depends on the appropriate regulators setting, and in some cases is not effective enough. To make a control scheme, it is necessary to choose the coefficients that would ensure stability and the best quality of control. The manual setting of the regulator is performed after initial approximations of parameters were calculated by any method, using the identified model. It can be manually done, based on the rules derived from experience, theoretical analysis and numerical experiments.

Dual control. The deficiency of a priori information results in the necessity to combine learning and controlling the object. This type of control is called the dual control. The dual control was discovered by A. A. Feldbaum in 1960 and its further development was based on the statistical decision theory [6]. It is worth noting that the training control systems are the systems that have a "memory". In other words, they are able not only to examine the object performance data, but also to develop reasonable control actions. The theory of dual control gained further development in researches of various authors, in particular B. Wittenmark [7]. In the last research the attention to bulkiness of analytical results on synthesis of an optimum control algorithm is paid and substitution of control algorithms in the form of non-optimum dual regulators is carried out. Under conditions of smaller prior information the problem of dual control was considered by Ja. Z. Cypkin [8; 9]. Here the prior requirements to probability random factors density weaken, but the knowledge of a research object parametrical structure is required.

Nonparametric dual control algorithm, described in detail in [10] in a discrete form:

$$u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1}, \tag{2}$$

where u_s^* – an augend accumulating the knowledge about the object, for subsequent formation of adaptive control action; $\Delta u_{s+1} = \varepsilon\left(x_{s+1}^* - x_s\right)$ – "learning" search steps. The parameter ε is found from the minimum of the quadratic criterion ε :

$$R(\varepsilon) = \sum_{k=1}^{s}\left(x_{s+1}^* - x_s\right)^2 = \min_{\varepsilon}, k \neq i. \tag{3}$$

This is the dualism of the algorithm (2). The first augend u_s^* of equation (2) depends on the level of a priori information about the object of study.

The state of a one-dimensional dynamical system at a given time depends on the input actions and on its states in the past [11]:

$$x_t = F\left(x_{t-1}, \ldots, x_{t-k}, u_t\right), \tag{4}$$

where k is the known depth of memory (in the terminology of A. A. Feldbaum) [6], found somehow from the available a priori information. If we draw an analogy with the description of the studied process in continuous time in the form of differential equations, then k is the order of the highest derivative in the differential equation. Here is essential that the type of a functional is not defined to within parameters. It is a situation where the control problem is formulated under the conditions of both parametric and nonparametric indeterminacy [11]. It should be noted that the discrete equation (4) has a corresponding analogue among the differential equations.

Let us introduce the following re-designation [12]:

$$z_t = \left(z_1, \ldots, z_{k+1}\right) = \left(x_{t-1}, \ldots, x_{t-k}, u_t\right), \tag{5}$$

where

$$x_t = f\left(z_t\right). \tag{6}$$

Thus, the structure of the process model (4) can be partially parametrized. In this case, the task of a dynamic system control is reduced to the task of a static system control by introducing a mathematical re-designation (5)–(6). Taking into account the re-designation data (5)–(6), the control scheme can be shown in the following scheme (fig. 3). The diagram illustrates a model of a dynamical system in discrete time, reduced to a model of a static system, when variables u_t and x_{t-1}, ..., x_{t-k} are input variables of the process [13; 14].

As a nonparametric model of the process, the following nonparametric estimation of the regression function can be adopted:

$$\overline{x}_t = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_i \cdot \Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{k}\Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s}\Phi\left(\frac{u_s - u_i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{k}\Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s}\right)}. \tag{7}$$

Formula (7) is a direct operator A, then the inverse operator is (8):

$$u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_i \cdot \Phi\left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{k}\Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s}\Phi\left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{k}\Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s}\right)}, \tag{8}$$

where $\Phi(\cdot)$ nuclear bell-shaped function [15]. The formula (8) is the augend u_s^* from equation (2).

Let us consider the dualism of the algorithm (2). In the initial stage of control, the main role belongs to the second addened Δu_{s+1} from formula (2). It is a case of active information accumulation in the system of dual control which begins with the first observation of input and output variables of an object emergence. As learning proceeds (with the accumulation of information), the augend u_s^* plays an increasing role in forming the control action u_{s+1}. Thus, in the course of object dual control both the stage of studying of an object, and a stage of its reduction to the purpose appear.

Let us compare the results of nonparametric dual control algorithm (2) and the standard algorithm PI-regulator. The sample size (u_i, x_i) is 100. We present the work of two control algorithms at the changing control action (fig. 4).

In fig. 4 the following notations are accepted: $x(t)$ is the object output when the control unit is a nonparametric dual control regulator, $\overline{x}(t)$ is the object output when the control unit is the PI regulator, $x^*(t)$ is a control action

(set points). The control error for the nonparametric regulator is 0.07, for the PI regulator is 0.34. In the experiment presented in fig. 4, the augend of the dual control algorithm (2) is equal to equation (8). Let us consider the work of nonparametric dual control algorithm in detail. Control training begins with the first dyad observations x_1, u_1. On the initial control stage some time (accumulation of sample) is required to bring the object to a set state, but on the next steps, the algorithm almost instantly reaches the task.

Let us imagine the situation when $x^*(t)$ is set in a random way (fig. 5).

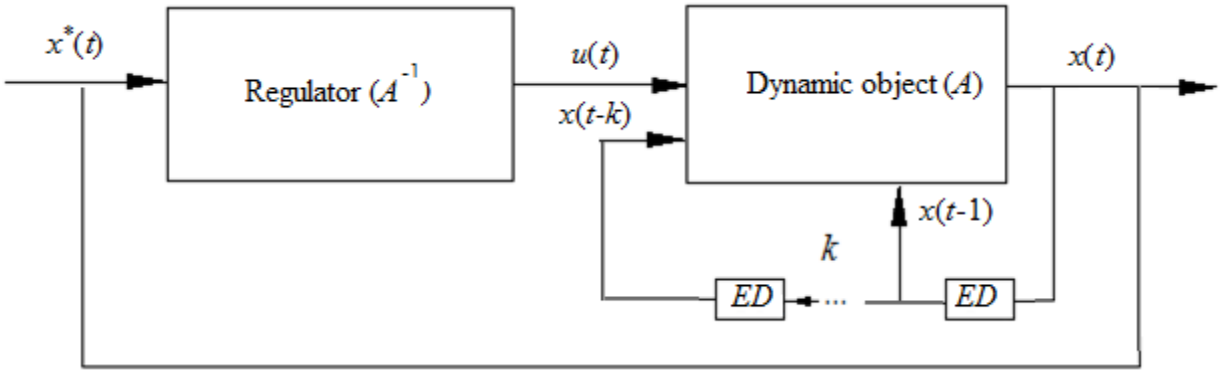


Fig. 3. Dynamic process control diagram, where *ED* is the delay element

Рис. 3. Схема управления динамическим процессом, где *ED* – элемент запаздывания

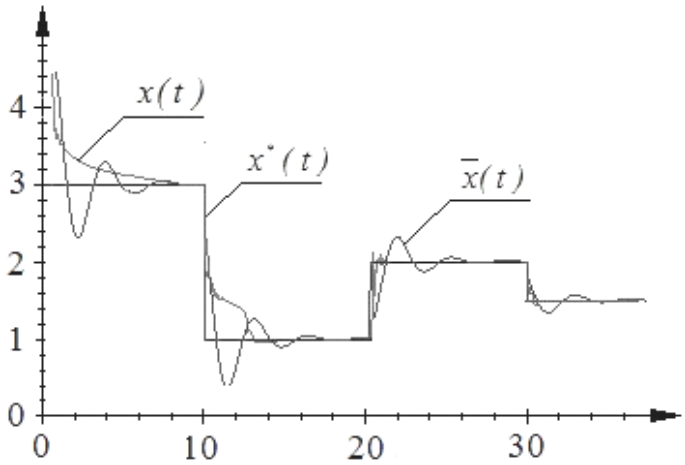


Fig. 4. The control results at a stepwise action

Рис. 4. Результаты управления при ступенчатом задании

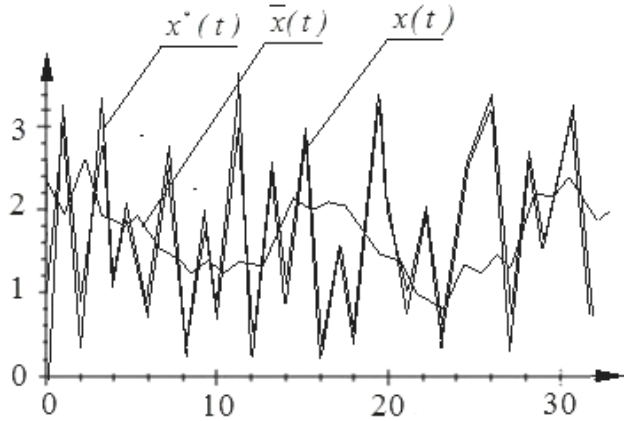


Fig. 5. Control results at random task

Рис. 5. Результаты управления при случайном задании

Fig. 5 shows the operation of two control algorithms in case of random setting. In this case we illustrated the situation when the nonparametric dual control algorithm obviously surpasses the standard PI-regulator. From the given figure the high quality of control by means of the nonparametric regulator is visible, even at such "exotic" option when the task is random. Not any known regulator will cope with a similar task. These results are of considerable interest only from the theoretical point of view because in practice this option is not found.

Conclusion. In the article the algorithms for nonparametric control and standard algorithms (P-, PI-, PID-regulators) under condition of nonparametric indeterminacy are analyzed. In the present article, the functional dependence between input-output variables of the process is unknown, and it is impossible to uniquely determinate parametrical structure of object the model, a differential equation, or its transfer function. Therefore, the standard control algorithms which form the control action due to the feedback within the observation error (residual), in particular PI-algorithm which does not require the knowledge of the object model parametric structure, are chosen as the object of comparison In this case, the discrete equation is used for describing the process. The problem is reduced to the solution of nonparametric estimation of regression function using observations of the object "input-output". The use of nonparametric algorithms under partial nonparametric indeterminacy is illustrated in the computational experiment. The simulation results showed a significant superiority of nonparametric dual control algorithms over standard regulators at different control action values.

References

1. Wenk C. J., Bar-Shalom Y. A multiple model adaptive dual control algorithm for stochastic systems with unknown parameters. *Automatic Control, IEEE Transactions*. 2003, Vol. 25, Iss. 4, P. 703–710.

2. Duan Lia, Fucai Qianb, Peilin Fuc. Optimal nominal dual control for discrete-time linear-quadratic Gaussian problems with unknown parameters. *Automatica*. 2008, Vol. 44, Iss. 1, P. 119–127.

3. Tse E., Bar-Shalom Y. An actively adaptive control for linear systems with random parameters via the dual control approach. *Automatic Control, IEEE Transactions.* 2003, Vol. 18, Iss. 2, P. 109–117.

4. Filatov N. M., Keuchel U., Unbehauen H. Dual control for an unstable mechanical plant. *Control Systems, IEEE.* 1996, Vol. 16, Iss. 4, P. 31–37.

5. Kulikovskiy R. *Optimal'nyye i adaptivnyye protsessy v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya* [Optimal and adaptive processes in automatic control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 380 p.

6. Fel'dbaum A. A. *Osnovy teorii optimal'nyh avtomaticheskih system* [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. Moscw, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.

7. Wittenmark B. Adaptive dual control methods: An overview. *In 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing*. 1995, P. 67–72. Budapest, Hungary. [Survey article].

8. Cypkin Ja. Z. *Adaptaciya i obuchenie v avtomaticheskih sistemah* [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.

9. Cypkin Ja. Z. *Informacionnaja teorija identifikacii* [Information theory of identification]. Moscow, Nauka Publ., 1995, 336 p.

10. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnyh system* [Basic theory of adaptive systems]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 525 p.

11. Medvedev A. V. [The theory of nonparametric systems. Simulation]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4 (30), P. 4–9 (In Russ.).

12. Medvedev A. V. [Adaptation and learning in a non-parametric uncertainty]. *Fundamental'nye issledovaniya.* Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, P. 92–97.

13. Raskina A. V. [Determination of the structure of a linear dynamic object in nonparametric identification problems]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 4, P. 889–891 (In Russ.).

14. Bannikova A. V. Medvedev A. V. Ob [On objects with memory management in a non-parametric uncertainty]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 5(57), P. 26–37 (In Russ.).

15. Nadaraja Je. A. *Neparametricheskie ocenki plotnosti veroyatnosti i krivoy regressii* [Nonparametric estimation of probability density and the regression curve]. Tbilisi, Tbil. un-t Publ., 1983, 194 p.

Библиографические ссылки

1. Wenk C. J. Bar-Shalom Y. A multiple model adaptive dual control algorithm for stochastic systems with unknown parameters // Automatic Control, IEEE Transactions. 2003. Vol. 25, iss. 4. Pp. 703–710.

2. Duan Lia, Fucai Qianb, Peilin Fuc. Optimal nominal dual control for discrete-time linear-quadratic Gaussian problems with unknown parameters // Automatica. 2008. Vol. 44, iss. 1. Pp. 119–127.

3. Tse E., Bar-Shalom Y. An actively adaptive control for linear systems with random parameters via the dual control approach // Automatic Control, IEEE Transactions. 2003. Vol. 18, iss. 2. Pp. 109–117.

4. Filatov N. M., Keuchel U., Unbehauen H. Dual control for an unstable mechanical plant // Control Systems, IEEE. 1996. Vol. 16, iss. 4. Pp. 31–37.

5. Куликовский Р. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. М. : Наука, 1967. 380 с.

6. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.

7. Wittenmark B. Adaptive dual control methods: An overview // In 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing. Budapest, 1995. Pp. 67–72.

8. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.

9. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М. : Наука : Физматлит, 1995. 336 с.

10. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем / СибГАУ. Красноярск, 2015. 525 с.

11. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 4–9.

12. Медведев А. В. Адаптация и обучение в условиях непараметрической неопределенности // Фундаментальные исследования (физико-математические и технические науки). Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 92–97.

13. Раскина А. В. Определение структуры линейного динамического объекта в задачах непараметрической идентификации // Вестник СибГАУ. 2016. № 4. С. 889–891.

14. Банникова А. В., Медведев А. В. Об управлении объектами с памятью в условиях непараметрической неопределенности // Вестник СибГАУ. 2014. № 5(57). С. 26–37.

15. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд. Тбил. ун-та, 1983. 194 с.

© Raskina A. V., 2017

УДК 519.62+681.3.06

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 810–819

АЛГОРИТМЫ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОРНЕВЫХ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

А. А. Рогалев

Сибирский федеральный университет,
Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26
E-mail: a.rogalyov@yahoo.com

Представлены методы и алгоритмы для оценки возможностей управления, в которые входит определение возможности приведения управляемой системы в заданную точку y^* фазового пространства. Для этого вычисляются границы множества достижимости управляемой системы – множества точек фазового пространства, в которые возможно сдвигаться вдоль траектории управляемой системы, и проверяется включение точки y^* во множество достижимости. Подобные задачи часто встречаются на практике, например, при оценке маневренных возможностей летательных аппаратов. Оценки маневренных возможностей должны быть достаточно точными и реализуемыми за малое время. Описанные алгоритмы основаны на символьных формах представления решений. При реализации этих алгоритмов подвергаются обработке, а также хранятся числовые данные и символьные данные. Для оценки областей значений выражений, построенных формулами, исследуются структуры символьных данных, включающие формальные линейные комбинации корневых помеченных деревьев. Операции над корневыми помеченными поддеревьями выполняются при вложении структуры данных в ассоциативный набор данных. Возможны сокращения членов символьных формул, если неперестановочные операторы записываются через перестановочные операторы. Такие алгоритмы уменьшают время вычисления операторов, в которых присутствуют производные, часто экспоненциально. Приводятся примеры применения этих методов. Среди этих примеров можно отметить оценки для модели управления «машина Дуббинса», представляющей систему обыкновенных дифференциальных уравнений 3-го порядка и описывающей движение беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Поскольку скорости полета находятся в интервале 30–65 км/ч, который типичен для БПЛА, а скорость ветра на высоте 30–200 м над уровнем земли почти всегда превышает 18 км/ч, то БПЛА должны эффективно маневрировать в воздушном потоке. Вводя параметризацию кривой длинной дуги, постановка этой задачи формулируется геометрически. Это позволяет исследовать границы множеств достижимости в каждый момент времени. Анализ структуры множеств достижимости дает полезную информацию для оценки возможностей управления.

Ключевые слова: возможности управления, множества достижимости, области значений, символьные данные, корневые деревья.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 810–819

ALGORITHMS OF SYMBOLIC COMPUTATIONS BASED ON ROOT TREES FOR EVALUATING THE CAPABILITY OF THE CONTROL PROCESS

A. A. Rogalev

Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies
26, Academica Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: a.rogalyov@yahoo.com

The article presents the methods and algorithms for evaluating management capabilities. These methods also determine the possibility of bringing the controlled system to a given point y^* in the phase space. A set of reachability is a set of points in the phase space into which it is possible to move along the trajectory of the controlled system. It is necessary to check whether the point y^* is included in the reachable set. Such problems are often encountered in practice, for example, when assessing the maneuverability of aircraft. Estimates of maneuverability should be accurate enough and implemented in a short time. The algorithms described in the article are based on the symbolic forms of solutions. When these algorithms are implemented, numerical data and character data are processed, and also are stored. To evaluate the ranges of values of expressions constructed by formulas, the article explores the structures of character data, including formal linear combinations of root labeled trees. Operations on the root tagged subtrees are

performed by nesting the data structure in an associative data set. Reductions of the members of symbolic formulas are possible, if non-commutative operators are written through permutation operators. Such algorithms reduce the time of computation of operators in which derivatives are present, often exponentially. The article gives the examples of the application of these methods. Among these examples, we can mention the "Dobbins machine" control model, which represents the system of ordinary differential equations of the third order and describes the motion of an unmanned aerial vehicle (UAV). Since the flight speeds are in the range of 30–65 km/h, which is typical for UAVs, and the wind speed at an altitude of 30–200 m above the Earth level almost always exceeds 18 km/h, UAVs must effectively maneuver in the air flow. This allows us to examine the boundaries of reachable sets at each instant of time. An analysis of the reachable sets provides useful information for evaluating management capabilities.

Keywords: control capabilities, reachability sets, ranges of values, symbolic data, root trees.

Введение. Практическое построение управления объектом выполняется как в детерминированном случае, так и при априорной неопределенности внешних возмущений, а также неопределенности состояния текущего объекта. Появление неопределенности зависит от влияния различных неопределенных факторов: возмущающих воздействий, не поддающихся контролю погрешностей параметров в определении начальных условий, и некоторых других причин. Вероятностные (стохастические) характеристики во многих случаях не могут обеспечить эффективную оценку поведения управляемой системы с неопределенными факторами [1–3]. Причины этого заключаются в том, что их использование принципиально не гарантирует результат одного конкретного опыта (испытания) и, кроме того, требует знания статистических характеристик, которые не всегда доступны в достаточной мере [4–6].

В данной статье за основу выбран подход, в котором для оценки возможностей управления строятся формулы решения задачи (в общем случае приближенные с контролем их точности), что помогает оценить области значений этих формул. Области значений этих формул определяют гарантированные границы всех возможных фазовых состояний системы управления с учетом влияния всех факторов неопределенности. Эти границы являются верхней и нижней границами множеств достижимости. В статье описываются методы, повышающие эффективность работы с символьными формулами, на которых основан расчет включений множеств достижимых множеств. Символьные формулы решений лежат в основе этих алгоритмов, их объем может достигать значительной величины. Символьная формула (аналитическое выражение) определяется как последовательность имен переменных и знаков операций, которые нужно проделать в определенном порядке над значениями этих переменных, чтобы получить значение выражения. Поэтому символьный метод (аналитический метод) представляет метод преобразования символьной информации (символьных формул) на языке анализа математических выражений. В эти формулы могут включаться числовые константы с отложенным выполнением арифметических действий над ними. Можно провести некоторую аналогию с определением из [7], где предлагается разработать аппарат для преобразования уравнений с помощью простых математических приемов, большинство из которых подобно обычным алгебраическим алгоритмам. В нашем случае этот аппарат рассчитан на использование компьютеров, поэтому используются структуры данных, составленные из формальных линейных комбинаций корневых помеченных деревьев для эффективных символьных вычислений композиций операторов. Можно напомнить, что дерево – широко распространённая программная единица для хранения и обработки однотипных данных, имитирующая древовидную структуру в виде набора связанных узлов [8], являющаяся связным графом, не содержащим циклы. В статье будут использоваться корневые конечные деревья, в которых выделена одна вершина (корень дерева).

Формально корневое дерево определяется как конечное множество T одного или более узлов со следующими свойствами:

а) существует один корень дерева T;

б) остальные узлы (за исключением корня) распределены среди $m \geq 0$ непересекающихся множеств $T_1, ..., T_m$, и каждое из множеств является корневым деревом; деревья $T_1, ..., T_m$ называются поддеревьями данного корня T.

Постановка задачи оценки множеств достижимости. Структура управляемого объекта описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y, u) \tag{1}$$

с заданным классом допустимых управлений и начальным и конечным состоянием управляемого объекта при условиях, налагаемых на правую часть системы дифференциальных уравнений:

$$u(t) \in U \subset R^r, \quad t \in T = [t_0, t_F], \tag{2}$$

где Y_0, U – выпуклые компактные множества. Полагаем, что функция $f(t, y, u)$ вместе со своими производными по y, u является непрерывной относительно аргументов (t, y, u) на произведении $T \times R^n \times U$ и удовлетворяет условию Липшица по $y \in R^n$ с константой $L > 0$ $\forall\, y_1, y_2 \in R^n$ на $T \times R^n \times U$. Кусочно-непрерывная функция $u(t)$, $t \in T$, – это управляющая функция, удовлетворяющая (2) и такая, что при этом управлении существует непрерывная кусочно-дифференцируемая траектория $y(t)$ системы (1) при $t \in T$ и заданном начальном состоянии y_0. Множество допустимых управлений обозначается через U.

Для описания управляемых систем, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями

[1–3], во многих задачах требуются множества достижимости $Y(t)$ – множества точек в фазовом пространстве R^n, в которые возможно сдвинуться вдоль траектории решения задачи (1), (2) за интервал времени $[t^0, t]$.

Из определения множества достижимости ясно, что практически необходимо численно приближать множества достижимости и вычислять границы областей, содержащих эти множества, т. е. строить внешние оценки множеств достижимости. Более детально изучены множества достижимости линейных систем дифференциальных уравнений с выпуклыми ограничениями на управления и состояния системы. В работах [4–6] представлены численные методы, позволяющие вычислять границы множеств достижимости для систем такого типа, кроме того, методы нахождения внешних оценок множеств достижимости для линейных систем описаны в работах [3; 9].

Для нелинейных систем эта задача решается значительно более сложно, возможно оценивать множества достижимости, причем предлагаемые методы обычно требуют больших вычислительных затрат. Множества достижимости нелинейных систем в общем случае невыпуклые, несвязные. Созданы методы аппроксимации множеств достижимости, использующие уравнение Беллмана, а также принцип сравнения с реализацией метода эллипсоидов, известны схемы [2; 5] аппроксимации множеств достижимости за счет вычисления характерных точек множеств непосредственно через решение серии задач оптимального управления [10; 11].

Основная задача статьи – применить методы символьных вычислений на основе корневых деревьев для улучшения реализации гарантированных методов решения дифференциальных систем с учетом управляющих воздействий и основанных на символьном представлении решений. Более полное описание этого подхода можно найти в [12–18].

Пусть справедлива равномерная оценка $|y(t)|< b$ для всех решений (1) на интервале $t \in [t^0, T]$, где $b = \text{const} > 0$; множество достижимости $Y(t) = f(t, y, U)$ для всех y, $t \in [s, T]$, является компактным и выпуклым множеством.

Как было отмечено выше, символьная формула решений определяется сдвигом вдоль траектории решения и получается в процессе последовательного преобразования формул вида

$$Y^n = F^n(t^0, \ldots, t^n, Y^0, Y^1, \ldots, Y^n) = \\ = S^n(Y^0) \circ \ldots \circ S^2(Y^{i-1}) \circ S^1(Y^i). \quad (3)$$

Пусть $\varphi\left(y^0\right)$ обозначает однозначное отображение единичного интервала из R^1 на прямоугольный параллелепипед из R^n, которое каждой точке $t \in R$ ставит в соответствие некоторую точку $y = \varphi(t)$. Такое отображение определяет процедуру исполнения, в которой для каждой точки $t \in R$ определяется формула отображения $F\left(Y_1^0, Y_2^0, \ldots, Y_n^0\right)$ и процесс ее сборки по адресам. Для этого возможно использовать $\varphi\left(y^0\right)$ – непрерывное, однозначное отображение единичного интервала на *n*-мерный куб, называемое кривой Пеано, заполняющей пространство и представляющей непрерывную, нигде не дифференцируемую кривую, которая проходит через все точки единичного гиперкуба в пространстве R^n. Это соответствие задано отображением элементов конечного множества отрезков из единичного интервала и элементами конечного множества гиперкубов, входящих в R^n. Формула будет представлять рекурсивную структуру, размер которой изменяется. Для записи такой формулы в компьютере используются линейные динамические структуры.

В рассматриваемых задачах управление является измеримой функцией, что не допускает применения методов рядов Тейлора для построения опорных траекторий.

В символьный метод оценки множеств достижимости входит запись компонент символьных формул решений как векторных функций, состоящих из символьных компонент $s\left(t^k\right)$, зависящих от символьных форм начальных данных $y_1^0, \ldots, y_n^0$ и описывающих сдвиг вдоль кривой, аппроксимирующей траекторию решения системы, на каждом шаге. Сдвиг вдоль траектории решений определяется на основе построенных символьных формул решений. Символьные формулы не преобразуются на каждом шаге алгоритма, они хранятся в памяти компьютера, для этого полезным являются символьные формулы кусочно-полиномиальных функций. Используя символьную формулу *Y*, аппроксимирующую оператор сдвига вдоль траектории, в методе определяются прообразы экстремальных значений (верхних и нижних границ для множеств решений) как решения экстремальной задачи. Эти точки определяют границы множеств достижимости.

Выполнение преобразований символьных формул – это первый этап гарантированного метода включения решений, за которым следует этап числовых вычислений. Символьные преобразования реализуются в системах компьютерной алгебры. Однако такое применение компьютерной алгебры, как правило, является крайне затратным по времени исполнения, особенно если вычисления производятся в цикле. Найденные формулы часто являются громоздкими, что и приводит к неэкономным вычислениям, особенно если речь идет о вычислениях в цикле. Поэтому в статье предлагается хранить и обрабатывать формулы, хранящиеся в виде помеченных деревьев.

Преобразования символьных формул. Вычисления, рассматриваемые в статье, представлены как алгебраические выражения над входными данными, которые сохраняют важнейшие соотношения между входными данными и результирующей аналитической информацией. В предлагаемых методах символьных вычислений моделируются операторы присваивания, условные операторы, циклы и процедуры. Это помогает повысить эффективность и точность при настойчивом применении процедур упрощения.

Определим умножение на укоренившихся помеченных деревьях, тем самым создавая набор этих структур данных как ассоциативную алгебру. Алгебра гомоморфизмов задана на исходной алгебре операторов, отображаемой в данную алгебру деревьев. Если операторы представить на этой структуре данных, то появятся сокращения, связанные с тем, что неперестановочные операторы выражаются через коммутирующие операторы. Это приводит к алгоритму, применение которого для определения формул производных ускорит вычисления оператора экспоненциально. Многие вопросы, описанные в этом разделе, опираются на работы [19; 20].

Кратко напомним основные определения, используемые в этой работе.

Алгебра над полем – это векторное пространство, снабженное билинейным произведением. Отсюда следует, что алгебра над полем является одновременно векторным пространством и кольцом, причём эти структуры согласованы.

Алгебра Ли – это векторное пространство L над полем k; на пространстве введено билинейное отображение $[-,-]: L \times L \to L$, удовлетворяющее условиям:

$$[x,y]+[y,x]=0 \text{ для всех } x,y \in L;$$
$$[x,[y,z]]+[y,[z,x]]+[z,[x,y]]=0 \text{ для всех } x,y,z \in L.$$

Так, пример алгебры Ли выглядит следующим образом: билинейное отображение $[-,-]$ определено как $[x,y]=xy-yx$ для $x,y \in A$. Дифференцированием в алгебре U называется линейное отображение $\delta: U \to U$, удовлетворяющее правилу Лейбница дифференцирования произведения

$$\delta(ab)=\delta(a)b+a\delta(b).$$

Пусть R – это коммутативная алгебра с единичным элементом над полем k характеристики O. Пусть $D_1, ..., D_N$ – это N перестановочных производных R, т. е. для $i,j=1, ..., N$, $D_iD_ja=D_jD_ia$ для всех $a \in R$.

Предположим, что мы также получили M производных $Dif_1, ..., Dif_M \in R$, которые могут быть выражены как R линейных комбинаций производных D_i, т. е. для $j=1, ..., M$,

$$Dif_j=\sum_{\mu=1}^{N} a_j^{\mu} D_{\mu}, \text{ где } a_j^{\mu} \in R. \quad (4)$$

Для создания эффективного символьного алгоритма необходимо записать производные высокого порядка, порожденные $Dif_1, ..., Dif_M$, с помощью членов перестановочных производных $D_1, ..., D_N$.

Обозначим свободную ассоциативную алгебру символом $Dif_1, ..., Dif_M$, и пусть $Diff(D_1, ..., D_N; R)$ – это пространство формальных линейных дифференциальных операторов с коэффициентами из R, т. е. $Diff(D_1, ..., D_N; R)$ является алгеброй всех отображений $R \to R$, порожденных отображениями D_{μ} $L(a)$, $a \in R$ (отображение $L(a)$, $a \in R$ определяется зависимостью $L(a)(b)=ab$ для $b \in R$).

Пусть

$$\chi: k\langle E_1, ..., E_M\rangle \to Diff(D_1, ..., D_N; R) \quad (5)$$

обозначает отображение, которое отображает $p \in k\langle E_1, ..., E_M\rangle$ в линейный дифференциальный оператор $\chi(p)$, полученный подстановкой (1) и упрощением, с использованием того факта, что D_{μ} являются производными R. Пусть $p \in k\langle E_1, ..., E_M\rangle$ имеет вид $p=\sum_{i=1}^{l} p_i$, где каждый член p_i имеет степень m. Для расчета значения $\chi(p)$ будем вычислять $\chi(p_i)$. Это даст значение формулы $lm!N^m$ членов. Предположим, что $Expenditure(p)$ – это затраты применения алгоритма A для упрощения $p \in k\langle E_1,...,E_M\rangle$. Затраты пропорциональны количеству дифференцирований и умножений.

Тогда $\underset{Simple}{Expenditure}(p)=O\left(lmn!N^m\right)$.

Проанализируем алгоритм, выполняющий предварительную обработку выражения p, целью которой является устранение любых членов, сокращаемых после подстановок (1), из вычислений.

Возможно сформулировать следующую теорему.

Теорема 1. Предположим:

1) p – это сумма $l=2^{m-1}$ членов, каждый из которых является однородным относительно степени m;

2) $\chi(p)$ – это линейный дифференциальный оператор степени 1;

3) $m, N \to \infty$ таким образом, что $2^m << N^m$.

Тогда $$\frac{Expenditure_{Better}(p)}{Expenditure_{Simple}(p)}=O\left(\frac{1}{m \cdot 2^m}\right). \quad (6)$$

Напомним, что скобка Ли [,]: g × g → g – это билинейная, кососимметрическая операция, удовлетворяющая тождеству Якоби: $[[x, y], z] + [[z, x], y] + [[y, z], x] = 0$.

Значение теоремы 1 состоит в том, что алгоритм, представленный для упрощения вычисления производных, входящих в формулу $\chi(p)$, является методом, который часто экспоненциально улучшает эффективность вычислений. Конечно, если мы априорно знаем определенные свойства $\chi(p)$, то мы можем использовать эти свойства, чтобы вычисления были эффективнее. Тем не менее, наш алгоритм не требует знания свойств $\chi(p)$.

Сокращения, которые появляются, когда неперестановочные операторы выражены через коммутирующие операторы, возникают естественно. Это приводит к алгоритму, применение которого для операторов, таких как производные, ускоряет вычисления экспоненциально.

Пусть $\{E_1, ..., E_M\}$ – множество символов. Будем называть дерево помеченным метками $\{E_1, ..., E_M\}$, если каждому узлу дерева, отличному от корня, соответствует элемент $\{E_1, ..., E_M\}$, присвоенный ему. Обозначим множество всех деревьев, помеченных метками $\{E_1, ..., E_M\}$, через $Forest\{E_1, ..., E_M\}$. Пусть $k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\}$ обозначает векторное пространство над полем k с базисом $Forest\{E_1, ..., E_M\}$.

Определим умножение в $k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\}$ следующим образом. Поскольку набор помеченных деревьев образует базис для $k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\}$ векторного пространства, достаточно описать произведение двух помеченных деревьев.

Пусть t_1, t_2 – два помеченных дерева. Пусть $s_1, s_2, ..., s_r$ – дети корня t_1. Если t_2 имеет $n+1$ узлов (считая корень), существуют $(n+1)^r$ способов присоединения r поддеревьев t_1, для которых $s_1, ..., s_r$ используются как корни помеченного дерева t_2. Присоединим каждый s_i как потомок некоторого узла t_2, сохраняющий исходные метки. Произведение деревьев $t_1 t_2$ определяется как сумма этих $(n+1)^r$ помеченных деревьев. Можно показать, что это произведение ассоциативно и что дерево, состоящее только из корня, является мультипликативным тождеством (элементом, являющимся единичным для мультипликативной операции) (см. [19; 20] для доказательства).

Определим ко-умножение над $k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\}$ следующим образом.

Пусть t – помеченное дерево, и пусть $s_1, ..., s_r$ – дети корня t. Если P – подмножество $C_t = \{s_1, ..., s_r\}$, полагаем, что t_p – помеченное дерево, образованное путем создания (размещения) элементов из P как потомков нового корня. При этом сохраняются исходные метки. Определим ко-умножение как операцию $\Delta(t) = \sum_{P \subseteq C_t} t_p \otimes t_{C_t \setminus P}$, где $X \setminus Y$ обозначает операцию теоретико-множественного относительного дополнения Y в X. Определим ко-единицу измерения, полагая $\varepsilon(t)$ равным 1, если t имеет только один узел (его корень), и равным 0 в противном случае. Можно показать, что это делает $k\{Forest(E_1, ..., E_M)\}$ ко-коммутативной ко-алгеброй. Возможно определить шкалу градации на $k\{Forest(E_1, ..., E_M)\}$, полагая $k\{Forest(E_1, ..., E_M)\}$ подпространством $k\{Forest(E_1, ..., E_M)\}$, натянутым на деревья с $n+1$ узлами и обозначенным через $k\{Forest_n(E_1, ..., E_M)\}$.

Помеченное упорядоченное дерево является помеченным деревом, для которого существует линейное упорядочение потомков каждого узла. Обозначим векторное пространство над k с базисом из множества помеченных упорядоченных деревьев через $k\{LOF(E_1, ..., E_M)\}$. Определения операций умножения и ко-умножения для $k\{LOF(E_1, ..., E_M)\}$ аналогичны определениям, приведенным выше.

Следующая теорема доказана в работе [20].

Теорема 2. Набор помеченных деревьев t, корень которых имеет ровно одного потомка, является базисом для $P(k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\})$.

Доказательство. Непосредственно получим, что любое дерево, корень которого имеет только одного потомка *k*, охватывает примитивные элементы. Пусть $O = k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\}$, и определим линейное отображение $\pi : O \otimes O \to O$ следующим образом: если t_1 и t_2 – помеченные деревья, то $\pi(t_1 \otimes t_2)$ – это помеченное дерево, образованное путем идентификации корней t_1 и t_2. Другими словами, $\pi(t_1 \otimes t_2)$ является помеченным деревом, для которого поддеревья корня образуют все поддеревья корней t_1 и t_2. Легко видеть, что если t – помеченное дерево, корень которого имеет r потомков, то $\pi \circ \Delta(t) = 2^r t$. С другой стороны, если $a = \sum a_i t \in P(O)$, мы получаем, что $\pi \circ \Delta(a) = 2a$. Так как деревья t являются линейно независимыми, следует, что $a_i = 0$, если корень *t* имеет более одного потомка. Это завершает доказательство теоремы.

Далее опишем, как помеченные деревья могут быть использованы для упрощения вычислений дифференциальных операторов. Начнем с определения отображения

$$\psi : k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\} \to Diff(D_1, ..., D_N; R)$$

следующим образом.

Шаг 1. Задав помеченное дерево $t \in LF_m(E_1, ..., E_M)$, ставим в соответствие корню число 0 и назначаем остальным узлам числа 1, ..., m. Мы в дальнейшем идентифицируем узел с числом, назначенным узлу. Чтобы определить отображение, мы просуммируем индексы $\mu_1, ..., \mu_m$, связанные с каждым узлом дерева, кроме корня. Закрепим узел *k* дерева *t*, и пусть $l, ..., l'$ обозначают детей этого узла.

Пусть

$$R(k; \mu_l, ..., \mu_r) = \begin{cases} D_{\mu_l} ... D_{\mu_r} a_{\gamma_k}^{\mu_l}, \text{ если } k \text{ – не корень}, \\ D_{\mu_l} ... D_{\mu_r}, \text{ если } k \text{ – корень}. \end{cases}$$

Обозначим эту величину $R(k)$. Заметим, что $R(k) \in R$ при $k > 0$.

Шаг 2. Определим

$$\psi(t) = \sum_{\mu_1, ..., \mu_m = 1}^{N} R(m) ... R(1) R(0)$$

и расширим ψ на все $k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\}$ в силу его линейности.

Следующие три предложения описывают основные свойства отображения ψ. Первое предложение является примером упрощения факторизации χ с помощью множества помеченных деревьев. Легко получить, что часто менее затратно вычислять ψ и φ совместно, чем вычислять χ.

Предложение 1

а) отображение ψ является гомоморфизмом алгебры;

б) $\chi = \psi \circ \varphi$.

Доказательство. Доказательство (*а*) получено непосредственным вычислением по правилу Лейбница и содержится в работе [19]. Так как χ и $\psi \circ \varphi$ согласованы (располагаются) на генерируемом множестве $E_1, ..., E_M$, то часть (*б*) предложения 1 следует из части (*а*). Это завершает доказательство предложения.

На самом деле верно более сильное утверждение: отображение ψ соблюдает взаимодействие коумножения на $k\{Forest\{E_1, ..., E_M\}\}$-ассоциативной алгебре символов над помеченными деревьями и умножение в R в следующем смысле.

Предложение 2

Для всех $a, b \in R$ и для всех $t \in k\{LF(E_1, ..., E_M)\}$

$$\left((\psi \otimes \psi) \circ \Delta(t)\right)(a \otimes b) = \psi(t)(ab).$$

Для многих приложений важно знать, ограничиваются ли действия этих гомоморфизмов областью алгебры Ли, порожденной производными $E_1, ..., E_M$. Следующее ниже утверждение показывает, что если известны вычисленные элементы алгебры Ли, то следует рассматривать только деревья, корень которых содержит только один узел – потомка.

Предложение 3

а) пусть $L(E_1, ..., E_M)$ обозначает алгебру Ли, порожденную производными $E_1, ..., E_M$, тогда

$$\varphi\left(L(E_1, ..., E_M)\right) \subseteq P\left(k\{LF(E_1, ..., E_M)\}\right),$$

$$\psi\left(P\left(k\{LF(E_1, ..., E_M)\}\right)\right) \subseteq Der\ R;$$

б) элементы $L(E_1, ..., E_M)$ отображаются под действием φ в суммы деревьев, корень которых имеет только одного потомка.

Завершим этот раздел простым примером вычисления производной третьего порядка с использованием деревьев.

Фиксируем производные

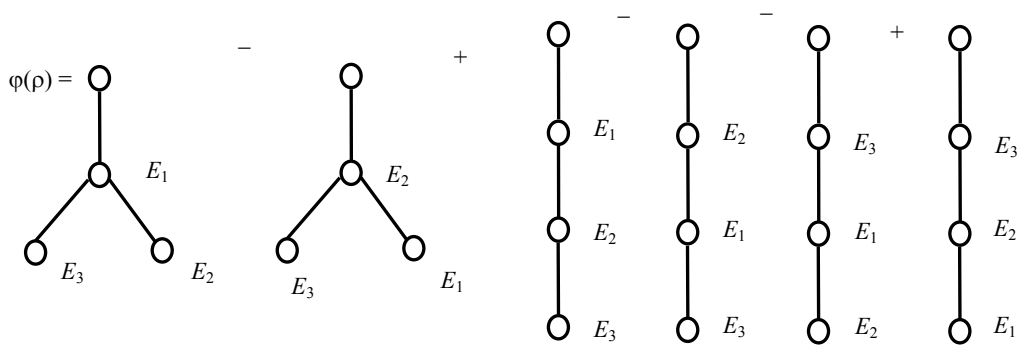
$$E_j = \sum_{\mu=1}^{N} a_j^{\mu} D_{\mu},\ 1 \le j \le 3,$$

и рассмотрим производные высшего порядка

$$p = E_3E_2E_1 - E_3E_1E_2 - E_2E_1E_3 + E_1E_2E_3.$$

Вычисление $\chi(p)$ «в лоб» включает в себя вычисление $24N^3$ членов: $8N^3$ – члены-сомножители D_{μ_1}, $2N^3$ из них сокращаются, $12N^3$ членов, содержащих множители $D_{\mu_2\mu_1}$, все из них сокращаются, и $4N^3$ членов, включающих множители $D_{\mu_3\mu_2\mu_1}$, все из них сокращаются.

Вычисляя $\varphi(p)$, получим



Все сокращения членов при вычислениях $\chi(p) = \psi(\varphi(p))$ происходят при вычислении $\varphi(p)$.

Сделаем следующие предположения: $p \in k\langle E_1, ..., E_m \rangle$ (элемент ассоциативной алгебры символов) есть сумма $p = \sum_{i=1}^{l} p_i$, где каждый член p_i имеет степень m; затраты на умножение составляют одну единицу; затраты на дифференцирование – одна единица; затраты на сложение равны нулю; затраты добавления узла к дереву – одна единица, так что стоимость построения дерева $t \in LF_m(E_1, ..., E_m)$ равна m единиц.

Предложение 1

Вычислительные затраты на вычисление $\chi(p)$ равны величине $2lmm!N^m$.

Доказательство. Предположим, что p_i имеет вид $E_{\gamma_m} ... E_{\gamma_1}$ для некоторых индексов $1 \le \gamma_1, ..., \gamma_m \le M$. Тогда $\chi(p)$ равно

$$\left(\sum_{\mu_m=1}^{N} a_{\gamma_m}^{\mu_m} D_{\mu_m}\right) ... \left(\sum_{\mu_1=1}^{N} a_{\gamma_1}^{\mu_1} D_{\mu_1}\right).$$

После разложения появляются $m!N^m$ членов, каждый из которых включает в себя m дифференцирований и m умножений (включая умножения и дифференцирования, связанные с применением оператора $\chi(p)$).

Предложение 2

Затраты на вычисление $\varphi(p)$ равны $lmm!$.

Доказательство. Моному степени m отображение φ ставит в соответствие сумму (объединение) $m!$ помеченных деревьев. Этот факт легко доказать по индукции (доказательство в [19]). По предположениям, представленным выше, затраты на построение помеченного дерева с m узлами (в дополнение к корню) составляют m единиц. Поэтому общие затраты равны $lmm!$.

Предложение 3

Пусть $\sigma = \varphi(p)$ обозначим через $|\sigma|$ число помеченных деревьев с ненулевыми коэффициентами σ. Тогда затраты на вычисление $\psi(\sigma)$ равны $2m|\sigma|N^m$.

Доказательство. Фиксируем помеченное дерево $t \in LF_m(E_1, ..., E_M)$. Из определения отображения ψ мы видим, что затраты на вычисление $\psi(t)$ равны $2mN^m$, и, следовательно, полные затраты равны $2m|\sigma|N^m$.

Объединяя эти три утверждения, получим теорему.

Теорема 3. В соответствии с принятыми выше предположениями затраты $Cost_{Simple}(p)$ вычисления $\chi(p) = \sum_{i=1}^{l} \chi(p_i)$ составляют $2lmm!N^m$, тогда как $Cost_{BETTER}(p)$ вычисления $L = \psi \circ \varphi(p)$ равны $lmm! + 2m|\sigma|N^m$.

Используя теорему 3, можно построить еще более эффективные алгоритмы для вычисления результата воздействия элементов $k\langle E_1, ..., E_M \rangle$, которые, как известно, являются дифференциальными операторами. В этом случае деревья, для которых корень имеет более одного потомка, даже не нужно строить.

Приложения

1. Рассмотрим движение управляемого объекта на плоскости, описываемого следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{gathered} \frac{dy_1}{dt} = V\cos\varphi, \\ \frac{dy_2}{dt} = V\sin\varphi, \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{k}{V}u, |u| \le 1, \\ V = \text{const}, k = \text{const} > 0. \end{gathered} \tag{7}$$

Значения угла φ рассматриваются на интервале $(-\pi, \pi)$. Здесь y_1, y_2 – координаты объекта, отождествляемого с точкой на плоскости; φ – угол между вектором скорости объекта и осью x; u – управляющий параметр, удовлетворяющий указанному ограничению и характеризующий скорость изменения угла φ; k – максимальное боковое ускорение; V – величина скорости; $\alpha = \frac{k}{V}$.

Неравенство в (7) ограничивает радиус кривизны траектории объекта, а именно, радиус кривизны не может больше единицы. Рассматриваемая система использовалась Р. Айзексом при постановке задачи «шофер-убийца» (рис. 1). Состояние $z_0 = (y_1(t_0), y_2(t_0), \varphi(t_0))$ объекта в начальный момент времени предполагается заданным.

Множество достижимости $G(T)$ в момент времени $T \ge 0$ есть совокупность всех точек фазового пространства, в каждую из которых возможен перевод системы (7) в момент времени $T \ge 0$ при помощи некоторого допустимого управления на промежутке $T = [0, t^*]$ из начальной точки z_0.

2. Рассмотрим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, в правую часть которой входит управляющее воздействие:

$$\begin{gathered} \frac{dy_1}{dt} = 2y_2 + y_4, \\ \frac{dy_2}{dt} = -2y_1 + y_3 + u(t), \\ \frac{dy_3}{dt} = y_2 + 10y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} = 2y_1 - 2y_3 + u_2(t). \end{gathered} \tag{8}$$

Система (8) – это гамильтонова система, имеющая гамильтониан

$$H = y_1^2 + y_2y_4 + 5y_4 + y_1^2 - y_1y_3 + y_3^2 - u_1(t)y_1 - u_2(t)y_3.$$

В этой формуле y_1, y_2 – обобщенные координаты, y_2, y_4 – обобщенные импульсы.

На возмущающие силы системы $u_1(t), u_2(t)$ наложены ограничения

$$\{|u_1| \le 1, |u_2| \le 1\}.$$

В [1] для этой системы были выбраны начальные данные в виде параллелепипедов размерности 4. Динамические оценки множеств достижимости были построены в виде эллипсоидов [1]. Поэтому полезно предложить гарантированные оценки множеств достижимости, качественно совпадающие с результатами [1], показывающими отсутствие экспоненциального роста границ эллипсоидов. В [1] графики построены в логарифмической шкале с несколькими числовыми метками. Других числовых данных для этой системы в [1] не приводится (рис. 2, 3).

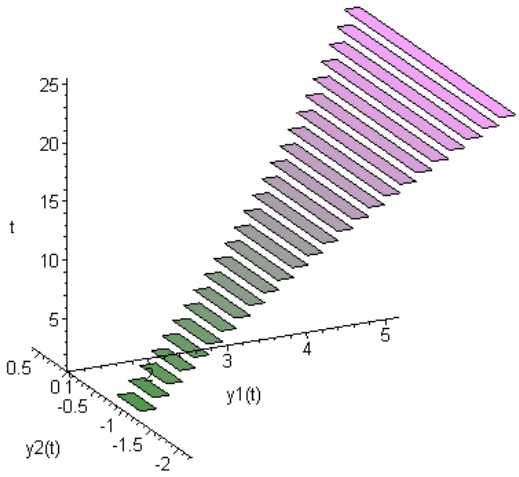


Рис. 1. Гарантированные границы множества достижимости задачи (7) – проекция на оси t–$y1$–$y2$ задачи «шофер-убийца»

Fig. 1. Guaranteed set boundaries of tasks (7) – projection on an axis t–$y1$–$y2$ “driver-killer” tasks

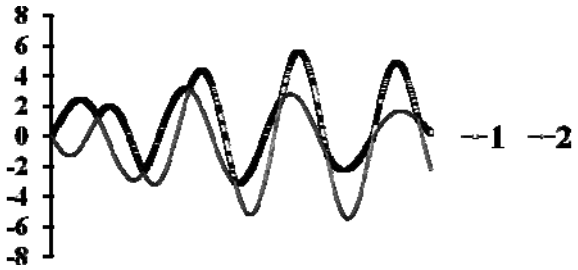


Рис. 2. Гарантированные границы множества достижимости задачи (8) – проекция на оси t–$y1$:
1 – верхняя граница проекции множества достижимости; 2 – нижняя граница проекции множеств достижимости

Fig. 2. Guaranteed set boundaries of tasks (8) – projection on an axis t–$y1$:
1 – upper limit of set projection of reachability; 2 – lower limit of set projection of reachability

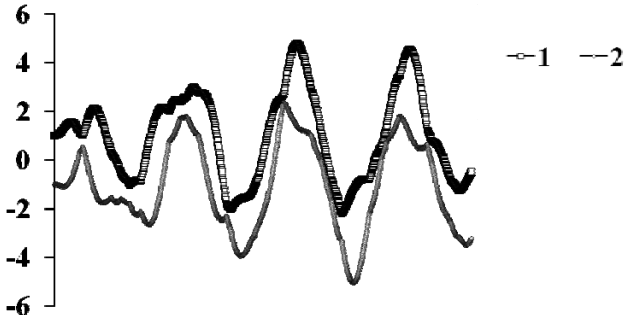


Рис. 3. Гарантированные границы множества достижимости задачи (8) – проекция на оси t–$y2$:
1 – верхняя граница проекции множества достижимости; 2 – нижняя граница проекции множеств достижимости

Fig. 3. Guaranteed set boundaries of tasks (8) – projection on an axis t–$y2$:
1 – upper limit of set projection of reachability; 2 – lower limit of set projection of reachability

Заключение. В статье описаны символьные алгоритмы, улучшающие применение гарантированных методов оценки решений дифференциальных уравнений для вычисления включений множеств достижимости управляемых систем. В статье применяется операция умножения на укоренившихся помеченных деревьях, что создает набор этих структур данных как ассоциативную алгебру. Затем определяется алгебра гомоморфизма из исходной алгебры операторов в данную алгебре деревьев. Сокращения, которые появляются, когда неперестановочные операторы выражены через коммутирующие операторы, возникают естественно, когда операторы представлены с использованием этой структуры данных. Это приводит к алгоритму, применение которого для операторов, таких как производные, ускоряет вычисления оператора, что повышает эффективность применения гарантированных методов.

Библиографические ссылки

1. Куржанский А. Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М. : Наука, 1977. 392 с.
2. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. М. : Наука, 1988. 319 с.
3. Chernousko F. L. State Estimation for Dynamic Systems. Boca Raton : CRC Press, 1994. 304 p.
4. Овсеевич А. И., Шматков А. М. К вопросу о сопоставлении вероятностного и гарантированного подходов к прогнозу фазового состояния динамических систем // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 4. С. 11–16.
5. Черноусько Ф. Л. Эллипсоидальные аппроксимации множеств достижимости управляемых линейных систем с неопределенной матрицей // Прикладная математика и механика. 1996. Т. 60, № 6. С. 940–950.
6. Куржанский А. Б., Фурасов Б. Д. Задачи гарантированной идентификации билинейных систем с дискретным временем // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 4. С. 5–12.
7. Кнут Д. Э. Искусство программирования. Т. 2. Основные алгоритмы. Т. 2. Основные алгоритмы. 3-е изд. М. : Вильямс, 2000. 832 с.
8. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М. : Иностранная литература, 1963. 832 с.
9. Пацко Б. В., Пятко С. Г., Федотов А. А. Трехмерные множества достижимости нелинейных управляемых систем // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2003. № 3. С. 8–16.
10. Тятюшкин А. И., Моржин О. В. Численное исследование множеств достижимости нелинейных управляемых дифференциальных систем // Автоматика и телемеханика. 2011. Вып. 6. С. 160–170.
11. Финкельштейн Е. А., Горнов А. Ю. Алгоритм квазиравномерного заполнения множества достижимости нелинейной управляемой системы // Известия Иркутского государственного университета. Сер. «Математика». 2017. Т. 19. С. 217–223.
12. Новиков В. А., Рогалев А. Н. Построение сходящихся верхних и нижних оценок решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1993. Т. 33, № 2. С. 219–231.
13. Рогалев А. Н. Включение множеств решений дифференциальных уравнений и гарантированные оценки глобальной ошибки // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8, № 6. С. 80–94.
14. Rogalyov A. N. Computation of reachable sets guaranteed bounds // Proceedings of the IASTED International Conferences on Automation, Control, and Information Technology – Control, Diagnostics, and Automation (ACIT – CDA 2010). Calgary, Canada : ACTA Press, 2010. B6. P. 132–139.
15. Рогалев А. Н. Вычисление гарантированных границ множеств достижимости управляемых систем // Автометрия. 2011. Т. 47, № 3. С. 100–112.
16. Rogalev A. N. Calculation of Guaranteed Boundaries of Reachable Sets of Controlled Systems // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2011. Vol. 47. № 3. P. 287–296.
17. Рогалев А. Н., Рогалев А. А. Численный расчет включений фазовых состояний в задачах наблюдения за движением самолета // Вестник СибГАУ. 2012. № 1(41). С. 53–57.
18. Рогалев А. Н., Рогалев А. А. Численные оценки предельных отклонений траекторий летательных аппаратов в атмосфере // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 1. С. 97–104.
19. Grossman R. Evaluation of expressions involving higher order derivations // J. Math. Systems, Estimation, and Control. 1991. № 1. P. 91–106.
20. Grossman R., Larson R. G. Hopf-algebraic structures of families of trees // J. Algebra. 1989. Vol. 126. P. 184–210.

References

1. Kurzhanskiy A. B. *Upravlenie i nablyudenie v usloviyakh neopredelennosti* [Control and observation under uncertainty]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 392 p.
2. Chernous'ko F. L. *Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem* [Dynamical systems phase state evaluating]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 319 p.
3. Chernousko F. L. State Estimation for Dynamic Systems. Boca Raton, CRC Press, 1994, 304 p.
4. Ovseevich A. I., Shmatkov A. M. [Probability and guaranteed approaches for dynamical systems phase state forecasting]. *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2007, No. 4, P. 11–16 (In Russ.).
5. Chernous'ko F. L. [Ellipsoidal approximation of reachable sets of controlled systems with matrix of uncertainty]. *Prikladnaya matematika i mekhanika.* 1996, Vol. 60, No. 6, P. 940–950 (In Russ).
6. Kurzhanskij A. B., Furasov B. D. Zadachi garantirovannoj identifikatsii bilinejnykh sistem s diskretnym vremenem, *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya.*2000, Vol. 4, P. 5–12 (in Russ).
7. Donal'd Knut. *Iskusstvo programmirovaniya. Osnovnye algoritmy* [Art of programming. Basic algorithms]. Moscow, Vil'yams Publ., 2000, 832 p.
8. Shennon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Notes on information theory and cybernetics]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1963, 832 p.

9. Packo B. V., Pyatko S. G., Fedotov A. A. [Three-dimensional reachable sets of nonlinear controlled systems]. *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya.* 2003, Vol. 3, P. 8–16 (In Russ.).

10. Tyatyushkin A. I., Morzhin O. V. [Nonlinear controlled differential systems reachable sets numerical estimation]. *Avtomatika i telemekhanika.* 2011, No. 6, P. 160–170 (In Russ).

11. Finkel'shtejn E. A., Gornov A. Yu. [Algorithm of quasiuniform fill of Nonlinear controlled systems reachable sets]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika.* 2017, Vol. 19, P. 217–223 (In Russ.).

12. Novikov V. A., Rogalev A. N. [Upper and lower converging bounds estimation constructing for ODE systems solutions]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki.* 1993, Vol. 33, No. 2, P. 219–231 (In Russ.).

13. Rogalev A. N. [Differential equations solutions sets inclusions and guaranteed estimation of global error]. *Vychislitel'nye tekhnologii.* 2003, Vol. 8, No. 6, P. 80–94 (In Russ.).

14. Rogalyov A. N. [Computation of reachable sets guaranteed bounds]. *Proceedings of the IASTED International Conferences on Automation, Control, and Information Technology – Control, Diagnostics, and Automation*. ACTA Press, B6, Calgary, Canada. 2010, P. 132–139.

15. Rogalev A. N. [Estimation of guaranteed bounds of controlled systems reachable sets]. *Avtometriya.* 2011, Vol. 47, No. 3, P. 100–112 (In Russ.).

16. Rogalev A. N. [Calculation of Guaranteed Boundaries of Reachable Sets of Controlled Systems]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* Allerton Press, 2011, Vol. 47, No. 3, P. 287–296.

17. Rogalev A. N., Rogalev A. A. [Numerical computations of phase states inclusions for problems of aircraft displacement inspection]. *Vestnik SibGAU.* 2012, No. 1(41), P. 53–57 (In Russ.).

18. Rogalev A. N., Rogalev A. A. [Numerical estimations of maximum deviations for aircraft trajectories in the atmosphere]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No 1, P. 97–104 (In Russ.).

19. Grossman R. [Evaluation of expressions involving higher order derivations]. *J. Math. Systems, Estimation, and Control.* 1991, No. 1, P. 91–106.

20. Grossman R., Larson R. G. Hopf-algebraic structures of families of trees. *J. Algebra.* 1989, Vol. 126, P. 184–210.

© Рогалев А. А., 2017

УДК 55.30.03; 621.865.8

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 820–824

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Л. В. Ручкин*, Н. Л. Ручкина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: leonid-ruchkin@yandex.ru

Приведены результаты моделирования трансформируемых механических систем, применяемых при создании робототехнических устройств и изделий космических аппаратов. Трансформируемые системы рассматриваются в виде многозвенных шарнирных механизмов с размещенными на звеньях или на основании приводами. Проведенный анализ публикаций показал, что при создании трансформируемых систем используются как разомкнутые, так и замкнутые кинематические цепи.

Для описания работы использованы уравнения Лагранжа второго рода в матричной форме, которые справедливы как для разомкнутых (последовательных), так и для замкнутых (параллельных) структур. С целью решения прямой задачи динамики и определения необходимых управляющих моментов приводов предложена математическая модель четырехзвенного механизма раскрытия штанги панелей солнечных батарей (последовательная структура). При построении модели принято, что механизм работает в горизонтальной плоскости, моменты сил тяжести, приложенные к звеньям, воспринимаются устройствами обезвешивания.

Моделирование проводилось в среде графического программирования LabVIEW, при этом разработаны виртуальные приборы, позволяющие вычислять координаты характерных точек механизма, например, центров масс звеньев как точек крепления устройств обезвешивания, виртуальные приборы вычисления матриц инерции звеньев, кинетической энергии звеньев и необходимых моментов сил приводов.

Предложенная модель и разработанные виртуальные приборы позволяют решать прямую задачу динамики трансформируемой механической системы и могут быть использованы при проектировании новых образцов робототехнических систем и изделий космических аппаратов.

Ключевые слова: робототехника, многозвенный трансформируемый механизм, матричный метод, прямая задача динамики.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 820–824

MODELING OF THE TRANSFORMABLE MECHANICAL SYSTEMS

L. V. Ruchkin*, N. L. Ruchkina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: leonid-ruchkin@yandex.ru

The results of the modeling of the transformable mechanical systems are presented. This mechanical systems are used for construction space vehicles and robotics devices. They are constituted of a succession of rigid bodies, each of them being linked to its predecessor and its successor by a one-degree-of-freedom joint. Each segment being linked to its successor by a revolute or translational joint. Each of the joints can being actuated. The analysis of publications has shown that open-loop kinematic chains and closed-loop kinematic chains are used.

The Lagrange dynamical equations in matrix form are used for the modeling mechanical systems. This equations are true for open-loop kinematic (serial) and closed-loop (parallel) kinematic chains. The forward problem of the dynamics of the opening the bar of the solar panels are presented (open-loop kinematic chain). In this case are accepted, that the rigid bodies of the device are rotating in a horizontal plane and gravitational moments are perceive by balance.

The modeling of the transformable mechanical systems are implemented by LabVIEW. Virtual instruments for calculate the coordinates of behavioral points of the mechanical system, for example, centre of mass, as points for mount balance, matrix of the inertia, the kinetic energy of the system and the force of the actuator are presented.

The article proposes the results of the modeling and virtual instruments are solved the forward problem of the dynamics of the transformable mechanical systems and can being used for design robotic system and manufacture of the space vehicles.

Keywords: robotics, multijointed transformable mechanism, matrix method, forward problem of the dynamics of robots.

Введение. При создании изделий ракетно-космической техники, робототехнических и мехатронных устройств широко применяются различные трансформируемые механические системы (антенны, рефлекторы, манипуляторы и т. п.). Подобные системы можно рассматривать как многозвенные механизмы с размещенными на звеньях или основании приводами. Из-за сложности проектирования, изготовления и отладки, а также с учетом высокой стоимости подобных устройств возникает необходимость построения их математических моделей и определения динамических характеристик. В статье рассмотрено построение математической модели на примере четырехзвенного механизма раскрытия штанги панелей солнечных батарей [1–11].

Кинематическая модель. Четырехзвенный механизм, расчетная схема которого приведена на рис. 1, состоит из основания (звено 0) и трех шарнирно соединенных звеньев 1, 2 и 3. Шарниры расположены в точках *A*, *B*, *F*, оси шарниров параллельны между собой. Перемещения звеньев кинематически связаны при помощи тросовых передач. Привод звеньев размещен на основании.

Для описания указанного плоского многозвенного механизма, построенного по разомкнутой кинематической схеме с тремя вращательными (*B*) парами пятого класса, оси которых параллельны между собой, воспользуемся матричным методом, который применим для описания как замкнутых, так и разомкнутых кинематических цепей [12].

С каждой *B* парой связываем *i*-ю систему координат $\vec{x}_{1,i}, \vec{x}_{2,i}, \vec{x}_{3,i}$, где *i* = 0–2. Разметка осей приведена на расчетной схеме (рис. 1). Каждую ось $\vec{x}_{3,i}$ направляем вдоль оси соответствующего шарнира перпендикулярно плоскости чертежа, ось $\vec{x}_{1,i}$ направляем вдоль или параллельно продольной оси *i*-го звена, ось $\vec{x}_{2,i}$ направляем так, чтобы система координат была правой.

Инерциальную систему координат $\vec{x}_{1,0}, \vec{x}_{2,0}, \vec{x}_{3,0}$ связываем с основанием (звено 0). Переход от *i*-й к (*i* – 1)-й системе координат описывается однородной матрицей перехода [12]

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos q_i & -\sin q_i & 0 & d_{x1,i-1} \cdot \cos q_i \\ \sin q_i & \cos q_i & 0 & d_{x2,i-1} \cdot \sin q_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где q_i – обобщенные координаты, определяемые как углы между векторами $\vec{x}_{1,i-1}$ и $\vec{x}_{1,i}$; $d_{x1,i-1}$ и $d_{x2,i-1}$ – сдвиг начала (*i* – 1)-й системы координат до совмещения с началом *i*-й системы координат соответственно по направлению векторов $\vec{x}_{1,i-1}$ и $\vec{x}_{2,i-1}$.

В инерциальной системе координат векторное уравнение кинематики четырехзвенного механизма имеет вид

$$\vec{r}_0^{\,i} = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdots A_i^{i-1} \cdot \vec{r}_i = B_i \cdot \vec{r}_i^{\,i},$$

где $B_i = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdots A_i^{i-1}$, $i = 1,\ 2,\ 3$.

Механическая модель. Составим уравнение движения для четырехзвенного механизма. Для этого воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода, которые справедливы для описания как замкнутых, так и разомкнутых кинематических цепей.

Уравнения Лагранжа второго рода [2; 3] для плоского многозвенного механизма имеют вид

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = M_k,$$

где $k = 1, \ldots, n$; n – число степеней подвижности; $L = K - P$ – функция Лагранжа; K – кинетическая энергия; P – потенциальная энергия; $\dot{q}_k$ – обобщенные скорости; M_k – обобщенные силы или моменты.

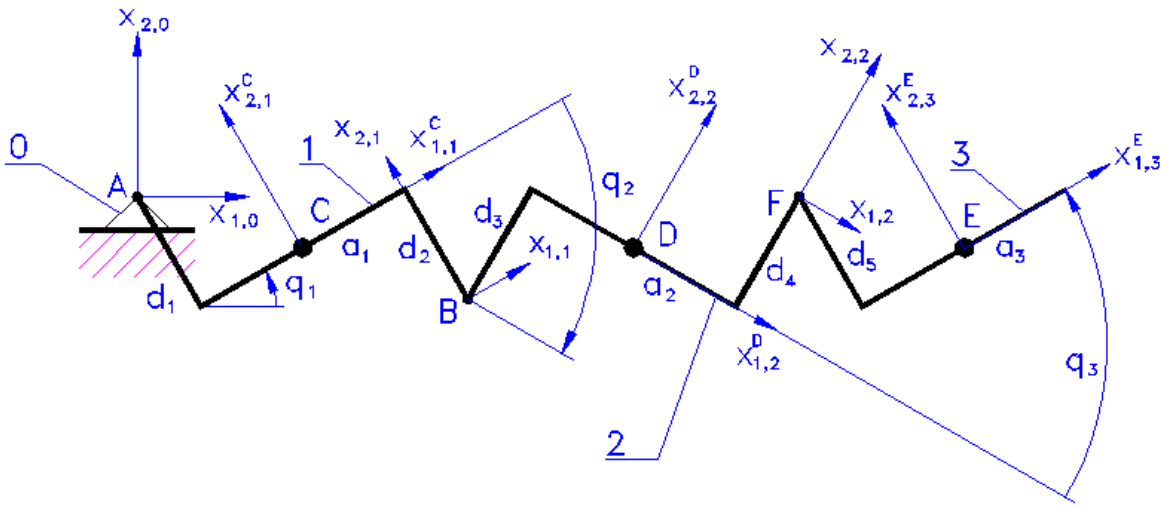


Рис. 1. Расчетная схема

Fig. 1. The design scheme

Полная кинетическая энергия i-го звена определяется [13; 14] выражением

$$K_i = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{i}\sum_{p=1}^{i} Tr\left(B_i^j \cdot I_i \cdot B_i^{pT}\right)\cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_p,$$

где матрица $B_i^j = \dfrac{\partial B_i}{\partial q_j}$ описывает изменение матрицы B_i при изменении обобщенной координаты q_j; I_i – матрица инерции i-го звена; T – знак операции транспонирования матриц.

Для сборки уравнений движения необходимо вычислить производные кинетической энергии по обобщенным скоростям и времени.

Для звеньев механизма

$$\frac{\partial K_1}{\partial \dot{q}_1} = Tr\left(B_1^1 \cdot I_1 \cdot B_1^{1T}\right)\cdot \dot{q}_1,$$

$$\frac{\partial K_2}{\partial \dot{q}_2} = Tr\left(B_2^1 \cdot I_2 \cdot B_2^{2T}\right)\cdot \dot{q}_1 + Tr\left(B_2^2 \cdot I_2 \cdot B_2^{2T}\right)\cdot \dot{q}_2,$$

$$\frac{\partial K_3}{\partial \dot{q}_3} = Tr\left(B_3^1 \cdot I_3 \cdot B_3^{3T}\right)\cdot \dot{q}_1 +$$

$$+ Tr\left(B_3^2 \cdot I_3 \cdot B_3^{3T}\right)\cdot \dot{q}_2 + Tr\left(B_3^3 \cdot I_3 \cdot B_3^{3T}\right)\cdot \dot{q}_3.$$

Матрица A_{1C}^0 преобразования системы координат $\vec{x}_{1,1}{}^C, \vec{x}_{2,1}{}^C, \vec{x}_{3,1}{}^C$ к инерциальной системе координат $\vec{x}_{1,0}, \vec{x}_{2,0}, \vec{x}_{3,0}$ имеет вид

$$A_{1C}^0 = A_1^q \cdot A_{2C}^d.$$

Матрица A_{2D}^1 преобразования системы координат $\vec{x}_{1,2}{}^D, \vec{x}_{2,2}{}^D, \vec{x}_{3,2}{}^D$, связанной с центром масс звена 2 (точка D), к системе координат $\vec{x}_{1,2}, \vec{x}_{2,2}, \vec{x}_{3,2}$, начало которой располагается на оси шарнира B, имеет вид

$$A_{2D}^1 = A_2^q \cdot A_{2D}^2,$$

где A_2^q – матрица поворота.

Определим необходимые матрицы преобразований для звена 3 механизма.

Матрица A_3^q элементарного поворота на угол q_3 вокруг оси $\vec{x}_{3,3}$ имеет вид

$$A_3^q = \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & 0 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица A_{3E}^3 элементарных сдвигов от системы координат $\vec{x}_{1,3}{}^E, \vec{x}_{2,3}{}^E, \vec{x}_{3,3}{}^E$, связанной с центром масс звена 3 (точка E), к системе координат $\vec{x}_{1,2}, \vec{x}_{2,2}, \vec{x}_{3,2}$, начало которой располагается на оси шарнира F, имеет вид

$$A_{3E}^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dfrac{a_3}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -d_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица A_{3E}^2 преобразования системы координат $\vec{x}_{1,3}{}^E, \vec{x}_{2,3}{}^E, \vec{x}_{3,3}{}^E$ к системе координат $\vec{x}_{1,2}, \vec{x}_{2,2}, \vec{x}_{3,2}$ имеет вид

$$A_{3E}^2 = A_3^q \cdot A_{3E}^3.$$

Определим [13; 14] матрицы B_i^{jk}, описывающие изменение матриц B_i^j при изменении координаты q_k:

$$B_1^{11} = \frac{\partial B_1^1}{\partial q_1} = \frac{\partial}{\partial q_1}\left(D \cdot A_{1C}^0\right) = D^2 \cdot A_{1C}^0 = D^2 \cdot A_1^q \cdot A_{2C}^d,$$

$$B_1^{12} = \frac{\partial B_2^1}{\partial q_2} = \frac{\partial}{\partial q_2}\left(D \cdot A_1^0 \cdot A_{2D}^1\right) = D \cdot A_1^0 \cdot D \cdot A_{2D}^1,$$

$$B_2^{22} = \frac{\partial B_2^2}{\partial q_2} = \frac{\partial}{\partial q_2}\left(A_1^0 \cdot D \cdot A_{2D}^1\right) = A_1^0 \cdot D^2 \cdot A_{2D}^1,$$

$$B_3^{13} = \frac{\partial B_3^1}{\partial q_2} = \frac{\partial}{\partial q_3}\left(D \cdot A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_{3E}^2\right) = D \cdot A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot D \cdot A_{3E}^2,$$

$$B_3^{23} = \frac{\partial B_3^2}{\partial q_2} = \frac{\partial}{\partial q_3}\left(A_1^0 \cdot D \cdot A_2^1 \cdot A_{3E}^2\right) = A_1^0 \cdot D \cdot A_2^1 \cdot D \cdot A_{3E}^2,$$

$$B_3^{33} = \frac{\partial B_3^3}{\partial q_2} = \frac{\partial}{\partial q_3}\left(A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot D \cdot A_{3E}^2\right) = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot D^2 \cdot A_{3E}^2,$$

где для вращательных пар матрица D имеет вид

$$D = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение движения для k-го звена имеет вид

$$\sum_{j=1}^{i=k} Tr\left(B_i^j \cdot I_i \cdot B_i^{kT}\right)\cdot \ddot{q}_j +$$

$$+ \sum_{j,p=1}^{i=k} Tr\left(B_i^{jp} \cdot I_i \cdot B_i^{kT}\right)\cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_p = M_k.$$

Механизм работает в горизонтальной плоскости, моменты сил тяжести, приложенные к звеньям, воспринимаются устройствами обезвешивания. Моментами сил трения в шарнирах на первом этапе исследования можно пренебречь. Следовательно, в качестве обобщенной силы принимаем момент сил M_1, приложенный к звену 1.

Звенья кинематически связаны и для полного раскрытия

$$q_2 = -2 \cdot q_1,\ q_3 = 2 \cdot q_1.$$

Моделирование проводилось в среде графического программирования LabVIEW [15; 16].

Задав диапазон изменения обобщенной координаты q_1, решаем прямую задачу кинематики, график изменения координат центров масс звеньев приведен на рис. 2. Для решения прямой задачи динамики созданы виртуальные приборы (ВП), позволяющие вычислять матрицы инерции звеньев, кинетическую энергию звеньев и необходимые усилия или моменты сил приводов (рис. 3).

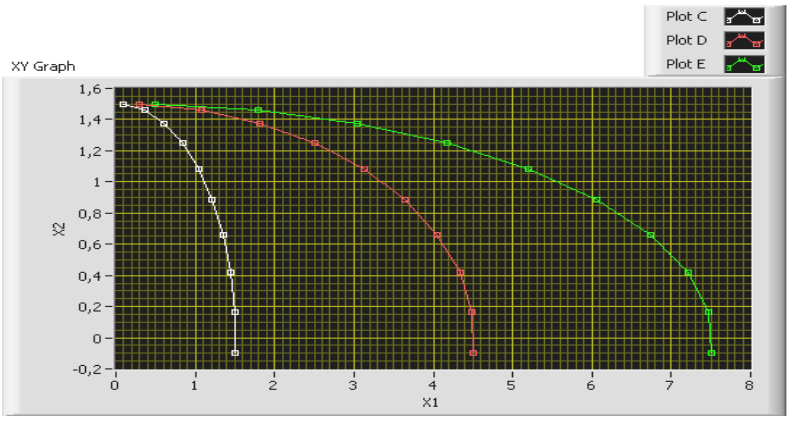


Рис. 2. Графики изменения координат центров масс звеньев механизма

Fig. 2. Graphs of the change in the coordinates of the centers of mass of the links of the mechanism

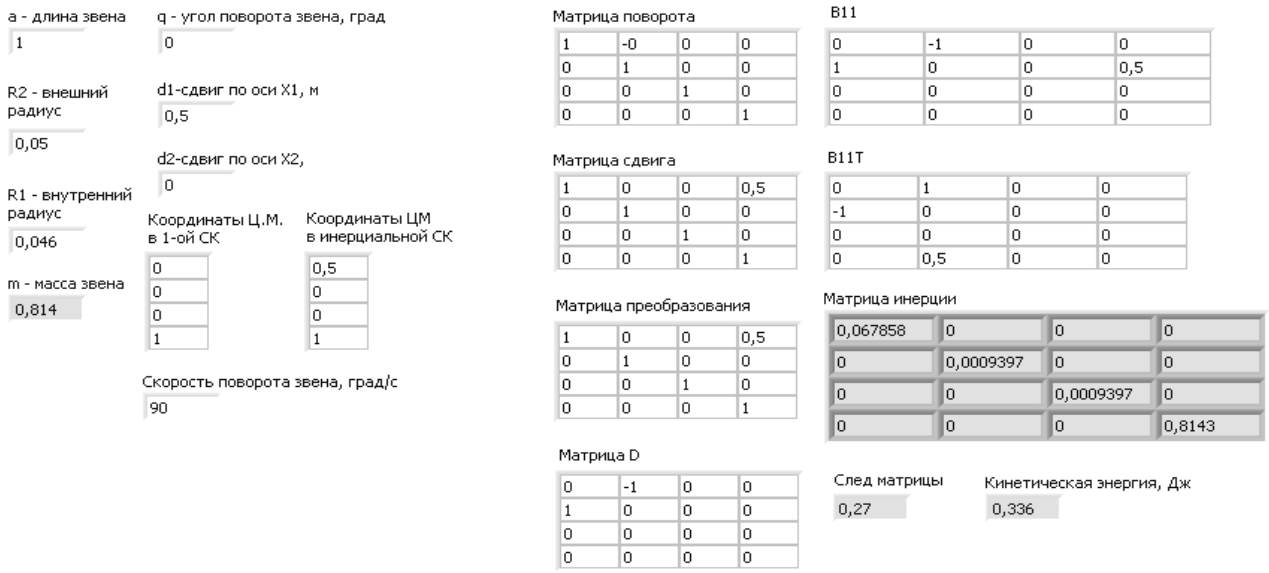


Рис. 3. Лицевая панель ВП вычисления кинетической энергии первого звена

Fig. 3. Front panel of the VP of calculating the kinetic energy of the first link

Заключение. В результате выполненной работы разработаны математическая модель и виртуальные приборы, позволяющие решать прямую задачу кинематики и динамики трансформируемых механических систем, т. е. на основании заданных законов движения и массоинерционных характеристик звеньев определять необходимые обобщенные силы или моменты, развиваемые приводами звеньев. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании робототехнических и мехатронных систем, а также при разработке механических систем космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Ручкин Л. В., Крючков М. А. Исследование движения манипулятора, построенного по замкнутой кинематической схеме ВВВВВВ с параллельными осями // Автоматизация и моделирование в производстве приборов : межвуз. сб. науч. тр. М. : МИП, 1989. С. 82–88.

2. Ручкин Л. В. Моделирование манипулятора с параллельным расположением приводов // Спутниковые системы связи и навигации : тр. Междунар. науч.-техн. конф. (30 сент. – 3 окт. 1997 г.) В 4 т. Т. 2 / КГТУ. Красноярск, 1997. С. 21–26.

3. Ручкин Л. В. Графическое моделирование плоских манипуляторов // Математические модели и методы их исследования : тезисы докладов / Краснояр. гос. ун-т. 1999. С. 177–178.

4. Система обезвешивания изделий космического аппарата на базе манипуляторов / Н. Л. Ручкина [и др.] // Решетневские чтения : материалы XII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (10–12 нояб. 2008, г. Красноярск) / под общ. ред. И. В. Ковалева ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. С. 26.

5. Ручкин Л. В., Ручкина Н. Л. Компенсация сил трения в механизмах устройств имитации невесомости // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ.

конф. (9 дек. 2016 г.). Т. 1 / СибГАУ. Красноярск, 2016. С. 146–153.

6. Ручкин Л. В., Ручкина Н. Л. Силовой расчет параллельного манипулятора в программном пакете LabVIEW // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (08–11 нояб. 2017, г. Красноярск). В 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 527–528.

7. Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Теоретические основы робототехники / отв. ред. С. М. Каплунов ; Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. В 2 кн. Кн. 1. М. : Наука, 2006. 383 с.

8. J.-P. Merlet. Parallel Robots. Springer, 2006. 418 p.

9. Буянкин В. М. Управление электроприводами для механизмов параллельной кинематики робота манипулятора типа «Хобот» // Исследование наукограда. 2012. № 1. С. 29–36.

10. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры / Л. А. Рыбак [и др.]. М., 2011. 148 с.

11. Подзоров П. В., Бушуев В. В. Синтез структур технологического оборудования на основе механизмов параллельной кинематики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 4. С. 11–18.

12. Фу К. С., Гонсалес Р. К., Ли К. С. Робототехника : пер. с англ. М. : Мир, 1989. 624 с.

13. Динамика управления роботами / В. В. Козлов [и др.]. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 384 с.

14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 832 с.

15. Суранов А. Я. LabVIEW 7: справочник по функциям. М. : ДМК Пресс, 2005. 512 с.

16. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 / под. ред. П. А. Бутырина. М. : ДМК Пресс, 2005. 264 с.

References

1. Ruchkin L. V., Kryuchkov M. A. [Analysis of motion of manipulator, constructed by closed-loop kinematic chains with parallel axeses]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proizvodstve priborov:* 1989, P. 82–88 (In Russ.).

2. Ruchkin L. V. [Modeling of the manipulator with parallel actuators]. *Sputnikovye sistemy svyazi i navigatsii: Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (30 sentyabrya – 3 oktyabrya 1997 g.) V 4-kh tomakh. T. 2*. Krasnoyarsk, P. 21–26 (In Russ.).

3. Ruchkin L. V. [Graphics simulation of the planar manipulator]. *Matematicheskie modeli i metody ikh issledovaniya*. Krasnoyarsk. 1999, P. 177–178 (In Russ.).

4. Ruchkina N. L., Bud'kov V. A., Skripka A. V., Ruchkin L. V. [System of balances of manufacture of the space vehicles by manipulators]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XII Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva (10–12 noyab. 2008, g. Krasnoyarsk)*. Krasnoyarsk, 2008, P. 26 (In Russ.).

5. Ruchkin L. V., Ruchkina N. L. [Compensation the friction forces in the devices of the mechanisms of clone the weightlessness]. *Lesnoy i khimicheskiy kompleksy – problemy i resheniya. Sbornik statey po materialam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (9 dekabrya 2016 g.)*. Vol. 1, Krasnoyarsk, 2016, P. 146–153 (In Russ.).

6. Ruchkin L. V., Ruchkina N. L. [Force calculation of the planar manipulator by LabVIEW]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXI Mezhdunar. nauch. - prakt. konf., posvyashch. pamyati gener. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M. F. Reshetneva (08–11 noyab. 2017, g. Krasnoyarsk)*. Krasnoyarsk, 2017. Ch. 1, P. 527–528 (In Russ.).

7. Korendyasev A. I., Salamandra B. L., Tyves L. I. *Teoreticheskie osnovy robototekhniki.* [Foundation of the theory of the robotics]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 383 p. (In Russ.).

8. Merlet J.-P., Parallel Robots. Springer, 2006, 418 p.

9. Buyankin V. M. [Motor control for mechanism of parallel kinematic of robot manipulator "Khobot"]. *Issledovanie naukograda*. 2012, No. 1, P. 29–36 (In Russ.).

10. Rybak L. A. *Effektivnye metody resheniya zadach kinematiki i dinamiki robota-stanka parallel'noy struktury* [Efficient method of epy solution tasks of the kinematic and dynamic of the robot-machine with parallel structure]. Moscow, 2011, 148 p. (In Russ.).

11. Podzorov P. V., Bushuev V. V. [Structure synthesis of manufacturing equipment based on mechanism of parallel kinematic]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2002. No. 4, P. 11–18 (In Russ.).

12. Fu K. S., Gonsales R. K., Li K. S. *Robototekhnika*. [Robotics]. Moscow, 1989, 624 p. (In Russ.).

13. Kozlov V. V., Makarychev V. P., Timofeev A. V., Yurevich E. I. *Dinamika upravleniya robotami*. [The dynamic of the control of the robot] Moscow, Nauka Publ., 1984, 384 p. (In Russ.).

14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. [The reference book of the mathematic for scientist and engineer]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 832 p. (In Russ.).

15. Suranov A. Y. *LabVIEW 7: spravochnik po funktsiyam*. [LabVIEW 7: The reference book of the functions]. Moscow, DMK Press Publ., 2005, 512 p. (In Russ.).

16. Butyrin P. A. *Avtomatizatsiya fizicheskikh issledovaniy i eksperimenta: komp'yuternye izmereniya i virtual'nye pribory na osnove LabVIEW 7* [Automation of the physical researches and experiment: computer-aided instrumentation and virtual instruments by LabVIEW 7]. Moscow, DMK Press Publ., 2005, 264 p. (In Russ.).

© Ручкин Л. В., Ручкина Н. Л., 2017

UDC 52-601

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 825–832

TO THE PROBLEM OF NONPARAMETRIC ROBUST ESTIMATION OF THE REGRESSION FUNCTION ON OBSERVATIONS

L. N. Sopova[1], S. S. Chernova[2*]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University, Institute of space and Information Technologies
26b, Academica Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
[*]E-mail: chsvetlanas@gmail.com

There are parametric and nonparametric statistical models in the literature. These models differ from each other in levels of the prior indeterminacy in the statistical description of observations. The difference in ways these models were created tends to smoothing by introduction of transition models. It is explained by the fact that a statistical model, as well as any other model, is inevitable idealization and it can be only successful approximation of actual processes at its best. Emphasizing this fact, Box writes: "All models are irregular, but some of them are useful".

When using statistical procedures it is desirable to have information about what deviations have a decisive influence on the final conclusion at statistical analysis. In case the true distribution is not normal, there can be questions of normal theory reference procedures applicability. The recent research approach called "robast statistics" and offered as "third generation statistics" after parametric and nonparametric statistics by American mathematician J. Tyyuki is devoted to answer formulated above questions and create statistical procedures insensitive to deviations from assumptions. A number of publications on this approach constantly increases, there are already monographs, among them the first book of Hyubera, the book by F. Hampel and others, educational literature is also available.

The "robust" term, which corresponds to the definition "rough, strong", was introduced into statistical literature by Box in 1953 and since the middle of the sixtieth this term has became conventional for the section of statistics where statistical procedures insensitive to deviations from the accepted model assumptions develop. The robust idea has had a long history, which was described in Stigler's work. It appears in the work of K. Gauss, S. Newcomb, A. Eddington and others. However systematic development of robust ideas began with J. Tyyuki's works and, especially, after the work of Hyuber in 1964.

In this work an estimation of functions with a data outlier problem is given. In case of nonparametric indeterminacy the following steps are used to solve the problem:

1) the type of regression function with input data is set;

2) function estimation is applied.

We suggest the following reliable robust nonparametric estimation approach. The main idea is to exclude the data which can affect estimation.

Keywords: nonparametric regression estimation, nonparametric model, robust estimation procedure.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 825–832

К ЗАДАЧЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РОБАСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ФУНКЦИИ РЕГРЕССИИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ

Л. Н. Сопова[1], С. С. Чернова[2*]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26б
[*]E-mail: chsvetlanas@gmail.com

В литературе рассматриваются параметрические и непараметрические статистические модели. Эти модели отличаются друг от друга уровнями априорной неопределенности в статистическом описании наблюдений. Различие в способах задания этих моделей имеет тенденцию к сглаживанию, достигаемому путем введения промежуточных моделей. Это объясняется тем фактом, что статистическая модель, как и вообще любая модель, является неизбежной идеализацией и может оказаться в лучшем случае лишь удачной аппроксимацией реальных процессов. Подчеркивая этот факт, Бокс пишет: «Все модели неправильные, но некоторые из них полезны».

При использовании статистических процедур желательно иметь информацию о том, какие отклонения оказывают решающее влияние на конечный вывод при статистическом анализе. Могут возникнуть вопросы о применимости стандартных процедур нормальной теории, когда истинное распределение не является нормальным. Ответам на сформулированные вопросы и построению статистических процедур, нечувствительных к отклонениям от предположений, посвящено новое направление, названное робастной статистикой, которое было выделено американским математиком Дж. Тьюки в «статистику третьего поколения» после параметрической и непараметрической статистики. Публикации по этому направлению постоянно увеличиваются, уже имеется ряд монографий, среди них первая книга Хьюбера, книга Ф. Хампеля и др., также имеется и учебная литература.

Термин «робастность» соответствует английскому слову robust, перевод которого – «грубый, сильный, крепкий», в статистическую литературу этот термин был введен Боксом в 1953 году, и с середины шестидесятых годов этот термин стал общепризнанным для раздела статистики, в котором развиваются статистические процедуры, нечувствительные к отклонениям от предположений принятой модели. Отметим, что идеи робастности имеют давнюю историю, которая прослежена в работе Стиглера. Они появляются в работах К. Гаусса, С. Ньюкомба, А. Эдингтона и др. Однако систематическое развитие идей робастности начинается с работ Дж. Тьюки, и особенно после выхода работы Хьюбера в 1964 г.

Дана оценка функций с проблемой выброса данных. В случае непараметрической неопределенности для решения проблемы используются следующие шаги:

1) задан тип функции регрессии с исходными данными;

2) применяется оценка функции.

Предлагается надежный непараметрический подход к оценке. Основная идея состоит в том, чтобы исключить данные, которые могут повлиять на оценку.

Ключевые слова: непараметрические оценки функции регрессии, непараметрическая модель, процедура робастного оценивания.

Introduction. The problem of restitution of regression function on observations with outliers is considered [1–5]. When studying the task [6; 7], we use the suggested robust estimation procedure, which is a correction of the training sample free of outliers [8–11]. Thus, we obtain the function value and its restitution without outliers**.**

In the last decades of the last century, the intensive development and application of nonparametric and robust methods of data processing began [12–17]. The reason is that on the one hand there is the need to control complex economic and social structures without parametric descriptions, as well as technical objects, for which, for example, the applied methods stability is important to failures and noise in the operation of recording equipment, on the other hand, the development of computing technology, which makes it possible to implement laborious algorithms [18].

Nonparametric regression function estimatimation on observations. Nonparametric estimation of regression function on observations for a one-dimensional case is the following [19; 20]:

$$Y_s(x) = \frac{\sum_{i=1}^{s} y_i \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right)}, \qquad (1)$$

$\Phi(v)$ – is the kernel. The kernel is a finite bell-shaped square integrable function satisfying conditions [19; 20]:

$$0 < \Phi(v) < \infty \quad \forall v \in \cap(v), \ \frac{1}{c_s}\int \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right) dx = 1,$$

$$\lim_{n\to\infty} \frac{1}{c_s}\Phi\left(\frac{x - x_i}{c_s}\right) = \delta\left(x - x_i\right), \qquad (2)$$

c_s – blur coefficient which satisfies the following conditions:

$$c_s > 0, \ \lim_{s\to\infty} s(c_s)^k = \infty, \ \lim_{s\to\infty} c_s = 0. \qquad (3)$$

In case of multi-dimensional data (k-dimensional) it is:

$$Y_s(x) = \frac{\sum_{i=1}^{s} y_i \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s}\right)}, \qquad (4)$$

x_i, y_i, $i = \overline{1, s}$, – sample of observations; $\Phi(v)$ – bell-shaped function; v – random variable, c_s – blur coefficient.

Robust nonparametric regression function estimation on observations. Step-by-step experiment scheme is as followed:

1. The initial sample on an actual object is obtained.

2. We set up the blur coefficient and choose the bell-shaped function .

3. We check each sample point for estimation quality.

3.1. If the estimation quality is sufficient and inequality “more $2\sigma^2$” is not satisfied, then the initial sample becomes the working sample.

3.2. If the estimation quality is not sufficient and inequality “more $2\sigma^2$” is satisfied, then outliers are excluded from the initial sample and less points will become the working sample.

4. We restitute the regression function by means of nonparametric estimation.

Computing experiment. $y = \sin(x)^2$ is a function chosen for the computing experiment. When forming the training sample, outliers were artificially added.

The triangular kernel is used as a bell-shaped function $\Phi(v)$:

$$\Phi(v) = \begin{cases} 1 - |v|, & |v| \le 1, \\ 0, & |v| > 1. \end{cases} \qquad (5)$$

Further we perform the work with the entire sample constructing the function and its restitution, we find the criterion of accuracy. As the criterion of nonparametric estimation accuracy we use the quadratic criterion:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{s} \left(y_i - y_s(x_i) \right)^2, \qquad (6)$$

y_i – a true sample received on the formulas given above; $y_s(x_i)$ – is a nonparametric estimate.

After checking the accuracy criterion, we pay attention to the points at which the restitution error is big and they satisfy criterion (7). Elements of the training sample that satisfy the requirement:

$$\rho_i > 2\sigma^2, \qquad (7)$$

where $\rho_i = (y_i - y_s(x_i)), i = \overline{1,s},$ are allocated and excluded from the initial sample.

We consider in fig. 1 – is a training sample, 2 – is nonparametric estimation. The triangular kernel was used as a bell-shaped finite function,

We present the results of the numerical experiment illustrating the effectiveness of an algorithm. We consider restitution of regression function on observations, which has several outliers at a sample size 100.

For illustrative purposes, we will add the perturbation action to some observations:

$$h_i = l y_i \xi, \qquad (8)$$

where $\xi \in [-1,1]$, noise level is $l = 5$ %.

There are the elements of the sample, its approximation and two outliers on fig. 1. The restitution accuracy is 0.36. It is the same on fig. 2, except that 5 % noise level is added. The restitution accuracy is 0.40. It should be noted that restitution accuracy depends on whether there is the noise in the function.

There are five outliers on fig. 3. The restitution accuracy has obviously changed and is equal to 0.54.

Using $\rho_i > 2\sigma^2$, we exclude outliers from the initial sample.

Fig. 4 displays algorithm work with regard to robast estimation. In this case the sample size decreased because the program excluded outliers enterfering good restitution. In fig. 5 the 5 % noise level is added to the restituted function, accuracy of restitution decreased – 0.11, that is more than in fig. 4. Note that restitution accuracy significantly increased, not 0.36 and 0.54, but 0.06. It means that the given function was basically completely restituted.

As an experiment, the same function with the same outliers but for a smaller sample size – 60 was considered.

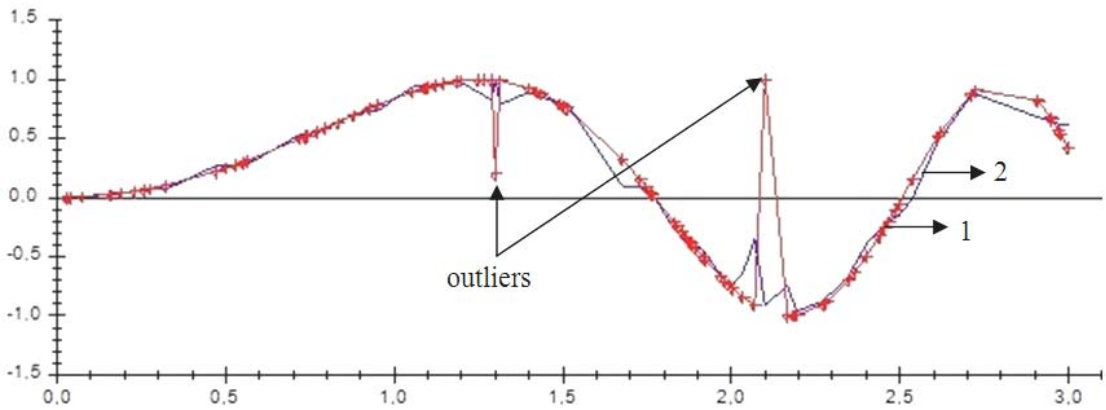


Fig. 1. Two-outlier restituted function

Рис. 1. Восстановленная функция с учетом двух выбросов

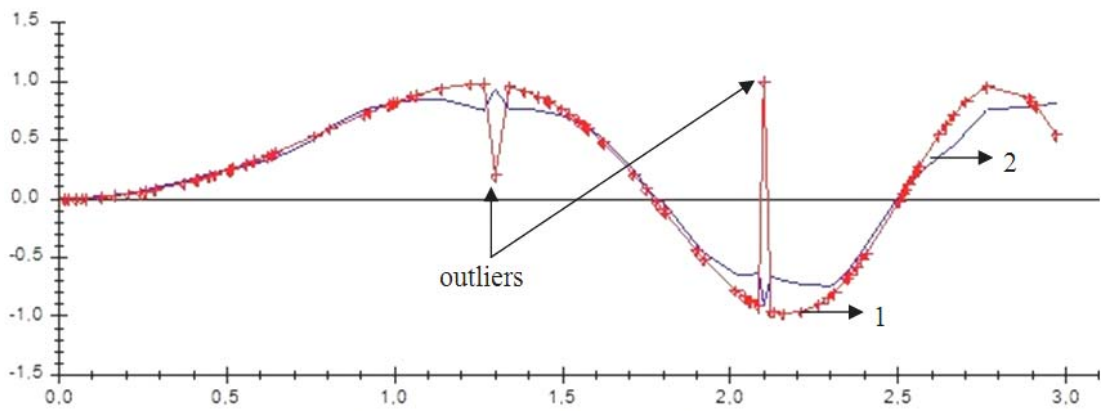


Fig. 2. Two-outlier restituted function with 5 % noise level

Рис. 2. Восстановленная функция с учетом двух выбросов и помехой 5 %

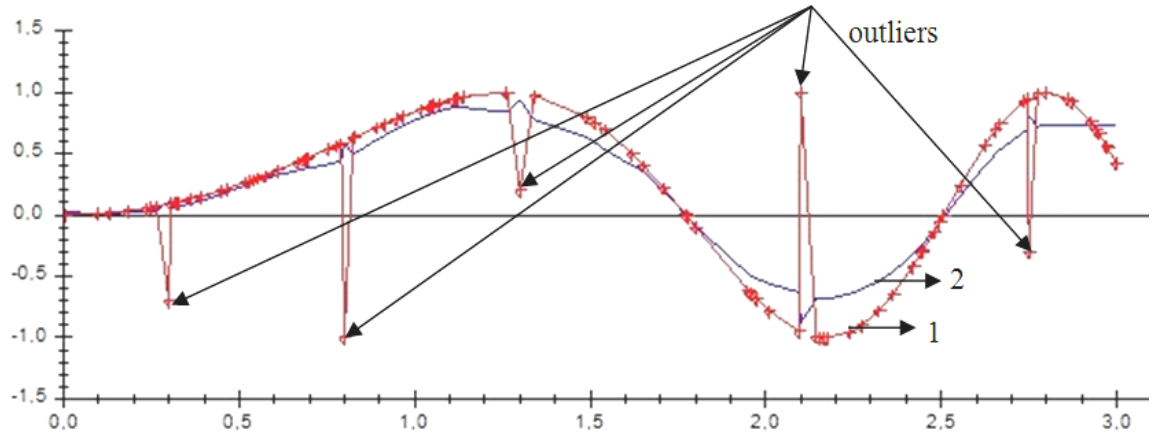


Fig. 3. Five-outlier restituted function

Рис. 3. Восстановленная функция с учетом пяти выбросов

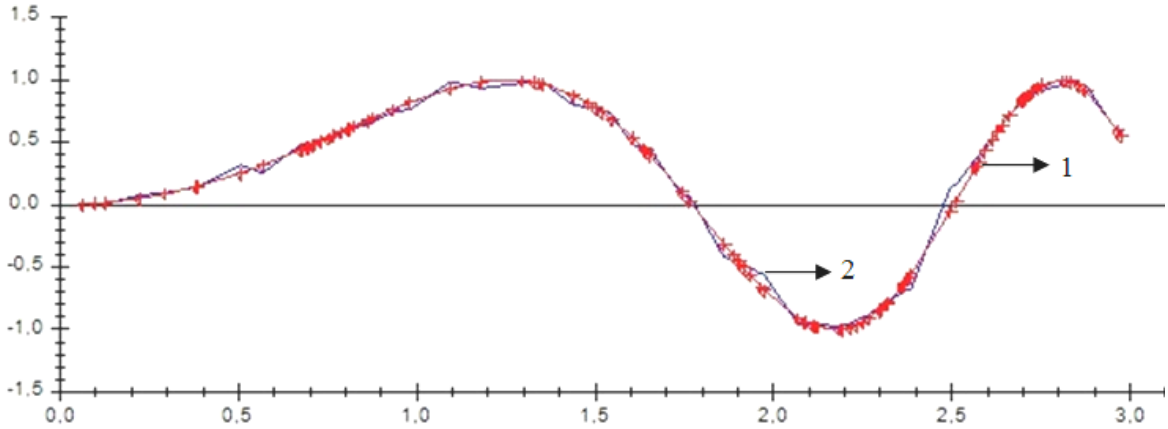


Fig. 4. None-outlier restituted function

Рис. 4. Восстановленная функция без учета выбросов

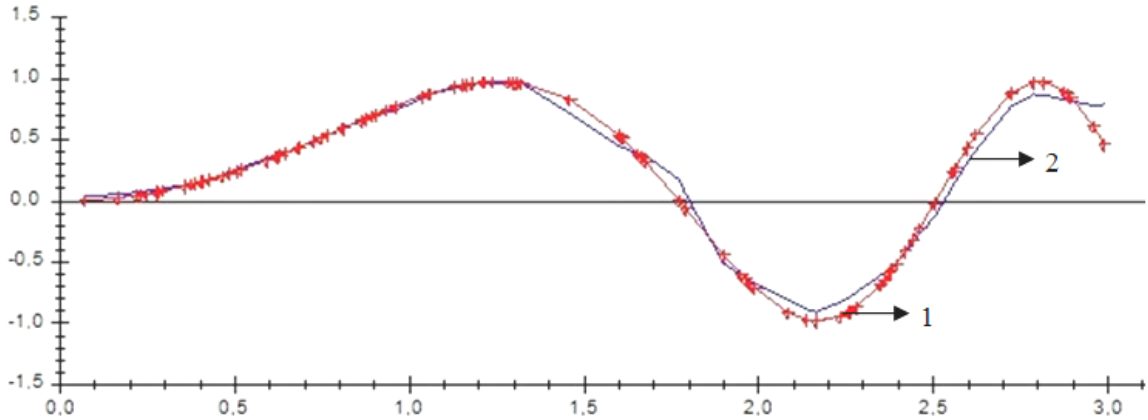


Fig. 5. None-outlier restituted function with 5 % noise level

Рис. 5. Восстановленная функция без учета выбросов, но с помехой 5 %

Sample units, its approximation and two outliers are also given in fig. 6. Restitution accuracy decreased to 0.45. Fig. 7 displays sample units with five outliers, the restitution error is 0.69. In fig. 8 the restituted function without outliers is presented, the accuracy of restitution is 0.14.

It is worth noticing that the sample size considerably influences restitution accuracy. For example, the accuracy of 100 elements sample size with regard to two outliers was 0.36, in the same case of 60 elements sample size it was 0.45.

For descriptive reasons we will consider one more similar function: $y = \cos(x)^2 \cdot \sin(x)$ with 100 elements sample size.

Sample units with one and three outliers respectively are given in fig. 9–11. Restitution accuracy at one outlier is 0.31, and at three – 0.41.

In fig. 10 the 5 % noise level was added to one-outlier restituted function. The restitution accuracy – 0.33. In this case, accuracy of restitution was not strongly affected by the noise.

Fig. 12 shows the restitution of function without outliers, the accuracy of restitution is 0.04. And in fig. 13 there is already 5 % noise level, restitution accuracy is 0.12. In this case, accuracy significantly decreased.

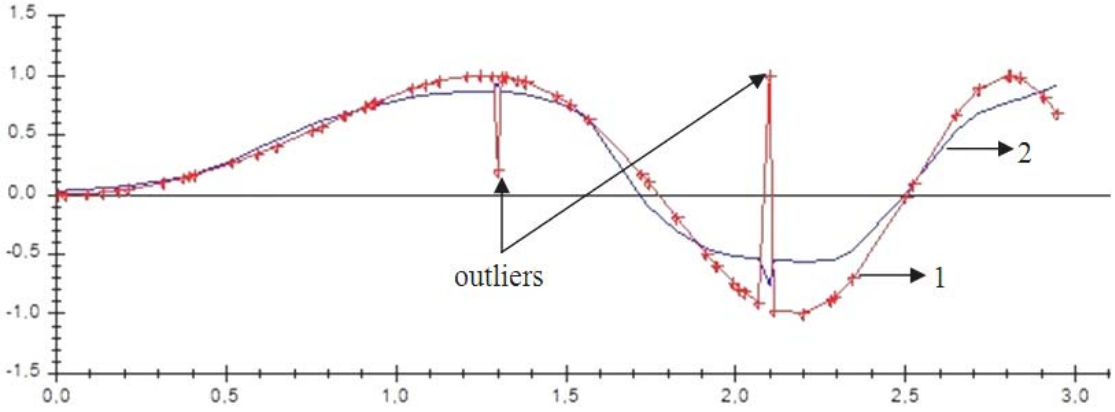


Fig. 2. Two-outlier function estimation

Рис. 6. Восстановленная функция с учетом двух выбросов

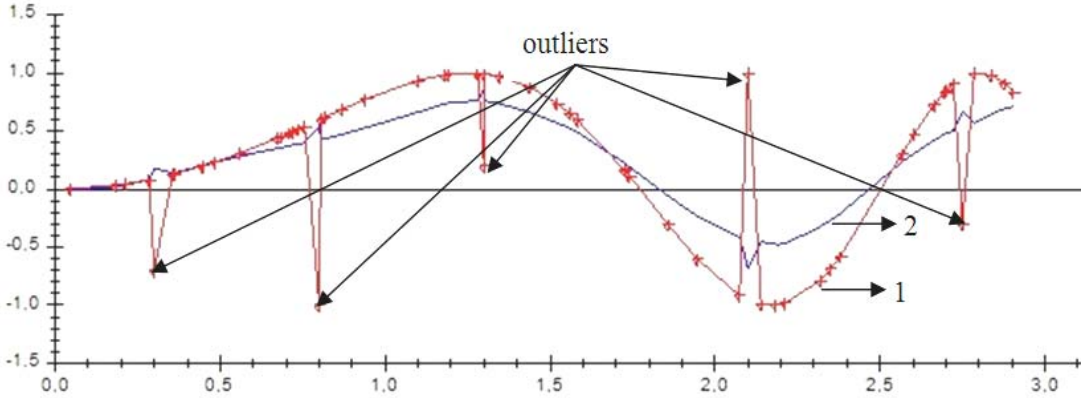


Fig. 7. Five-outlier restituted function

Рис. 7. Восстановленная функция с учетом пяти выбросов

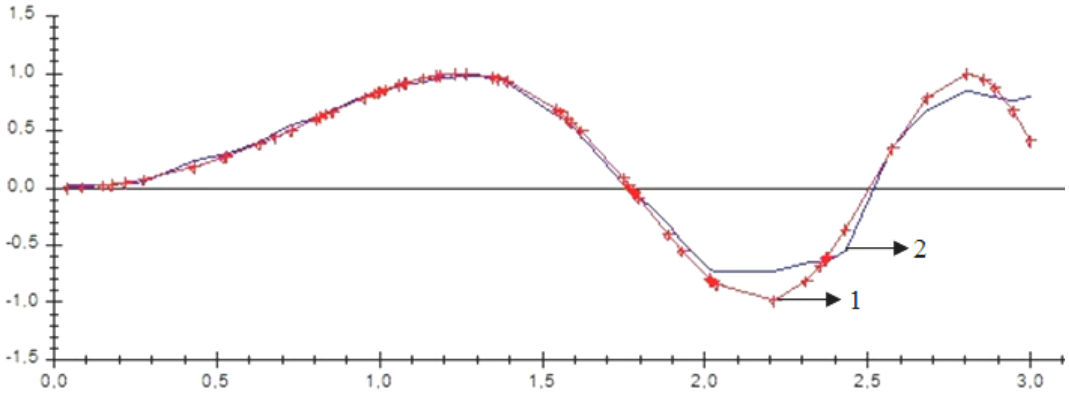


Fig. 8. None-outlier restituted function

Рис. 8. Восстановленная функция без учета выбросов

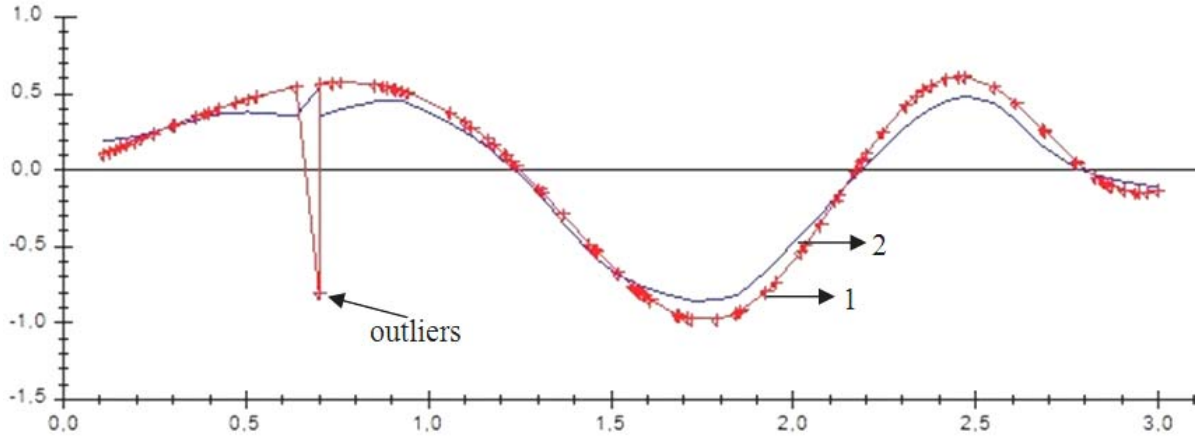


Fig. 9. One-outlier restituted function

Рис. 9. Восстановленная функция с учетом одного выброса

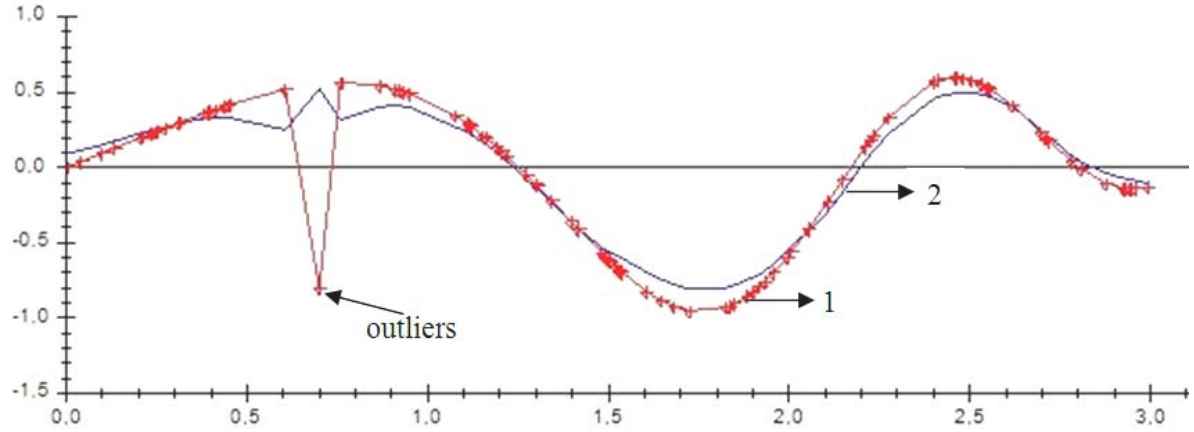


Fig. 10. One-outlier restituted function with 5 % noise level

Рис. 103. Восстановленная функция с учетом одного выброса и помехой 5 %

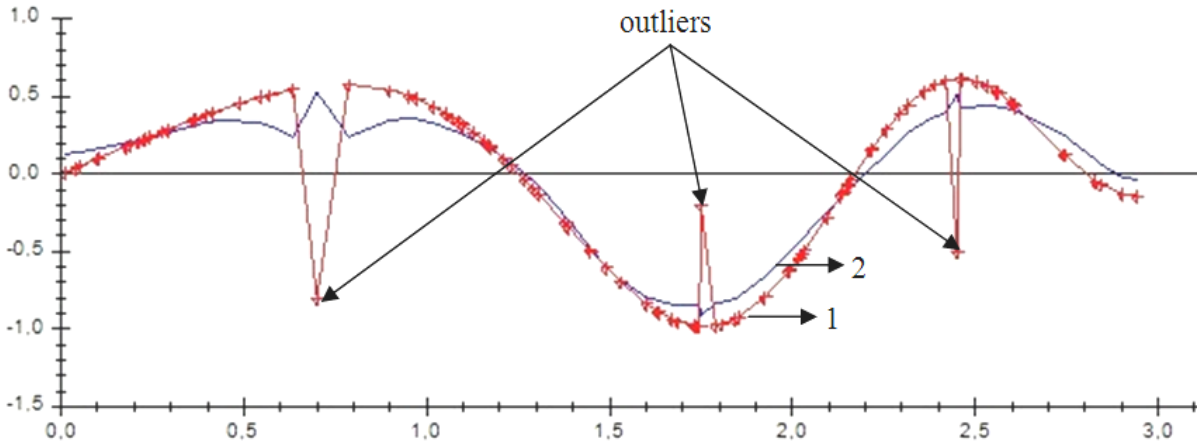


Fig. 11. Three-outlier restituted function

Рис. 11. Восстановленная функция с учетом трех выбросов

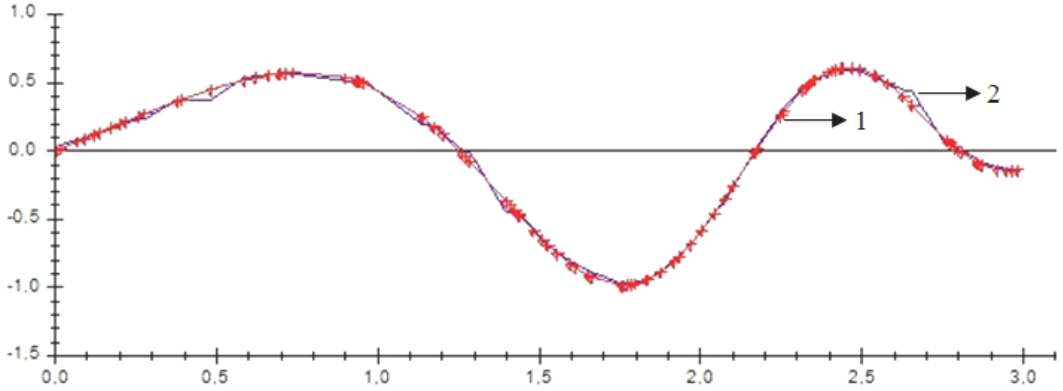


Fig. 12. None-outlier restituted function

Рис. 12. Восстановленная функция без учета выбросов

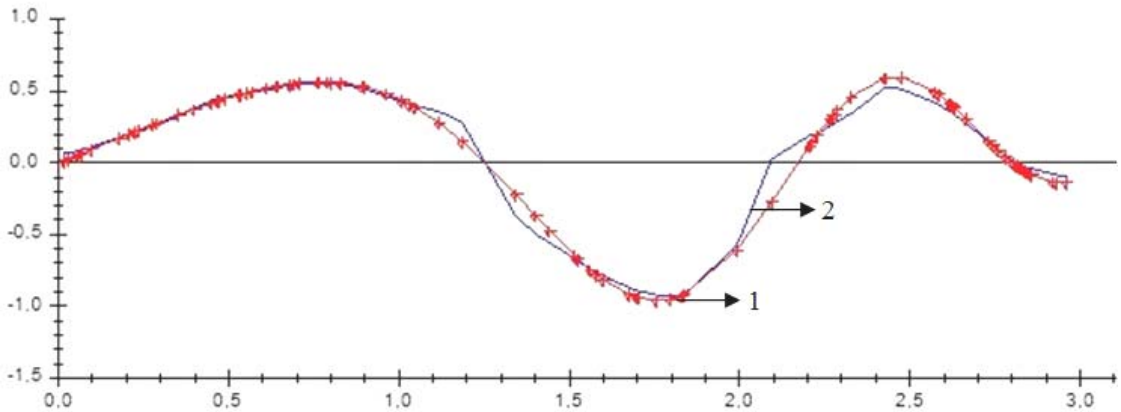


Fig. 13. None-outlier restituted function with 5 % noise level

Рис. 13. Восстановленная функция без учета выбросов, но с помехой 5 %

Conclusion. The main result of the article is that by means of the robast estimation approach it is possible to obtain significantly better function restitution quality on observations. It is worth noticing that restitution accuracy considerably increased after we excluded outliers. For descriptive reasons of the experiment several functions for restitution were considered. For the first function two sample sizes 100 and 60 were considered, we were visually convinced that the sample size has not small value for restitution. The restitution accuracy is significantly higher if the sample size is equal to 100 rather than if it is equal to 60.

References

1. Shulenin V. P. *Robastnye metody matematicheskoy statistiki* [Robust methods of mathematical statistics]. Tomsk, NTL Publ., 2016, 210 p.

2. Tarasenko F. P. *Neparametricheskaya statistika* [Nonparametric statistics]. Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta Publ., 1976, 292 p.

3. Kh'yuber P. *Robastnost' v statistike* [Robustness in statistics]. Moscow, Mir Publ., 1984, 304 p.

4. Chernova S. S., Shishkina A. V. [On nonparametric estimation of mutually ambiguous functions from observations]. *Molodoi uchenyi.* 2017, No. 25, P. 13–20 (In Russ.).

5. Korneeva A., Chernova S., Shishkina A. Nonparametric algorithms for recovery of mutually unbeatted functions on observations, Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric methods in cybernetics and system analysis – AMSA'2017. 18–22 September, Krasnoyarsk, Russia. 64–72 p.

6. Loner R. L., Uilkinson G. N. *Ustoychivye statisticheskie metody ocenki dannyh* [Sustainable statistical methods of data evaluation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 229 p.

7. Box G. E. P. Non-normality and test on variances. *Biometrika.* 1953, Vol. 40, P. 318–335 p.

8. Khampel' F., Ronchetti E., Raussei P., Shtael' V. *Robastnost' v statistike. Podkhod na osnove funktsii vliyaniya* [Robustness in statistics. The approach based on influence functions]. Moscow, Mir Publ., 1989, 512 p.

9. Shulenin V. P. *Matematicheskaya statistika. Ch. 1. Parametricheskaya statistika* [Mathematical statistics. Part 1. Parametric statistics]. Tomsk, NTL Publ., 2012, 540 p.

10. Shulenin V. P. *Matematicheskaya statistika. Ch. 2. Neparametricheskaja statistika* [Mathematical statistics. Part 2. Nonparametric statistics]. Tomsk, NTL Publ., 2012, 388 p.

11. Shulenin V. P. *Matematicheskaja statistika. Ch. 3. Robastnaja statistika* [Mathematical statistics. Part 3. Robust statistics]. Tomsk, NTL Publ., 2012, 520 p.

12. Stigler S. M. Simon Newcomb, Percy Daniel and history of robust estimations. *Journal of the American Statistical Association.* 1973, Vol. 68, P. 872−879.

13. Tukey J. W. A survey of sampling from contaminated distributions. Contributions to Probability and Statistics. Stanford Univ. Press, 1960, 448–485 p.

14. Tukey J. W. Bias and confidence in not-quite large samples (Abstract). *Annals of Mathematical Statistics.* 1958, Vol. 29, 614 p.

15. Tukey J. W. Data Analysis, Computation and Mathematics. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1972, Vol. XXX, P. 51–65 p.

16. Tukey J. W. Exploratory Data Analysis. Reading, Mass., Addison Wesley, 1977.

17. Huber P. J. Robust estimation of location parameter. *Annals of Mathematical Statistics.* 1964, Vol. 35, No. 1, P. 73–101 p.

18. Kitaeva A. V. *Robastnoe i neparametricheskoe ocenivanie harakteristik sluchajnyh posledovatel'nostey. Diss. Dokt. Fiz.-mat. nauk* [Robust and nonparametric estimation of characteristics of random sequences. Doct. Diss.]. Tomsk, 2009, 324 p.

19. Nadaraia E. A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroiatnostei i krivoi regressii* [Nonparametric estimation of probability density and regression curve]. Tbilisi, TGU Publ., 1983, 194 p.

20. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnykh system* [Fundamentals of the theory of adaptive systems]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 526 p.

Библиографические ссылки

1. Шуленин В. П. Робастные методы математической статистики. Томск : НТЛ, 2016. 210 с.

2. Тарасенко Ф. П. Непараметрическая статистика. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1976. 292 с.

3. Хьюбер П. Робастность в статистике. М. : Мир, 1989. 304 с.

4. Чернова С. С., Шишкина А. В. О непараметрическом оценивании взаимно неоднозначных функций по наблюдениям // Молодой ученый. 2017. № 25. С. 13–20.

5. Korneeva A., Chernova S., Shishkina A. Nonparametric algorithms for recovery of mutually unbeatted functions on observations // Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric methods in cybernetics and system analysis – AMSA'2017 (18–22 September). Krasnoyarsk. P. 64–72.

6. Лонер Р. Л., Уилкинсон Г. Н. Устойчивые статистические методы оценки данных : пер. с англ. под ред. Н. Г. Волкова. М. : Машиностроение, 1984. 229 с.

7. Box G. E. P. Non-normality and test on variances // Biometrika. 1953. Vol. 40. P. 318–335.

8. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния / Ф. Хампель [и др.]. М. : Мир, 1989. 512 с.

9. Шуленин В. П. Математическая статистика. Ч. 1. Параметрическая статистика : учебник. Томск : НТЛ, 2012. 540 с.

10. Шуленин В. П. Математическая статистика. Ч. 2. Непараметрическая статистика. Томск : НТЛ, 2012. 388 с.

11. Шуленин В. П. Математическая статистика. Ч. 3. Робастная статистика. Томск : НТЛ, 2012. 520 с.

12. Stigler S. M. Simon Newcomb, Percy Daniel and history of robust estimations // J. Amer. Statist. Assoc. 1973. Vol. 68. P. 872−879.

13. Tukey J. W. A survey of sampling from contaminated distributions // Contributions to Prob. Statist. / Ingram Olkin, ed. Stanford Univ. Press, 1960. P. 448–485.

14. Tukey J. W. Bias and confidence in not-quite large samples (Abstract) // Ann. Math. Statist. 1958. Vol. 29. P. 614.

15. Tukey J. W. Data Analysis, Computation and Mathematics // Quarterly of Applied Mathematics. 1972. Vol. XXX, No. I. Special Issue: Symposium on the Future of Applied Mathematics. P. 51–65.

16. Tukey J. W. Exploratory Data Analysis. Reading, Mass. : Addison Wesley, 1977.

17. Huber P. J. Robust estimation of location parameter // Ann. Math. Statist. 1964. Vol. 35. No. 1. P. 73–101.

18. Китаева А. В. Робастное и непараметрическое оценивание характеристик случайных последовательностей : дис. … д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2009. 324 с.

19. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : ТГУ, 1983. 194 с.

20. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем / СибГАУ. Красноярск, 2015. 526 с.

© Sopova L. N., Chernova S. S., 2017

Раздел
Part
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

УДК 629.7/621.01

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 834–840

О МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ В НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ И ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМАХ

О. Г. Бойко*, Е. А. Ачкасова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

Объектом исследования являются сложные функциональные системы воздушных судов. Предмет исследования включает методологический подход к расчету безотказности рассматриваемых систем. Темой статьи является развитие методов оценки безотказности сложных систем. Цель статьи заключается в исследовании правомерности и адекватности методологического подхода традиционной теории надежности в расчетах восстанавливаемых резервированных систем.

К традиционным относятся методы, основанные на использовании теоремы умножения вероятностей. В постановочной части решения задачи расчета безотказности рассматриваемых систем указываются условия, выполнение которых определяет отказ системы. В процессе решения задач традиционными методами эти условия игнорируются. Показано, что по традиционному решению системы отказывают только при условии отказа всех элементов. При расчете мажоритарной системы вероятность ее отказа определяется суммированием вероятностей отказа по двум состояниям. Причем предполагается, что второй отказ реализуется в уже ранее отказавшей системе. Отказы элементов, определяющие потерю работоспособности системы, реализуются в дискретные моменты времени, но при традиционном решении дискретность не учитывается.

Предлагаемый методологический подход основан на представлении о том, что при стационарном процессе вероятность отказа элемента в работоспособной части системы определяется суммарной плотностью вероятности потоков отказов элементов, составляющих эту часть системы, и их предшествующей наработкой.

При решении задач расчета безотказности рассматриваемых систем по предложенным методам теорема умножения вероятностей не используется. Определяются временные интервалы, на которых элементы системы отказывают и снижают ее работоспособность. Предлагаются решения с учетом изменения структуры системы по мере развития в ней отказов.

Результаты, полученные по предлагаемому подходу, строго соответствуют условиям отказов систем. Правомерность подхода подтверждена результатами экспериментальных исследований. Предлагаемые методы могут быть использованы при расчетах безотказности функциональных систем самолетов и космических аппаратов.

Ключевые слова: восстанавливаемая система, сложная система, вероятность отказа, плотность потока отказов элементов, дискретность отказов.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 834–840

MODELING OF THE FAILURE FORMATION MECHANISM IN NON-RECOVERABLE AND RECOVERABLE SYSTEMS

O. G. Boyko*, E. A. Achkasova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

In this article, the object of research is complex functional aircraft systems. The subject of the study includes a methodological approach to systems reliability calculation. The theme of this work is development of the methods for the complex systems reliability assessing. The aim of this work is to study the validity and adequacy of the methodological approach to the traditional reliability theory in the calculations of recoverable redundant systems.

Traditional methods include the methods that are based on the use of the multiplication theorem of probabilities. In the production section of faultlessness calculating solving problem are the conditions for the system failure of. These conditions are ignored, using traditional methods of solving problems. It is shown that according to the traditional solution, systems are only refused if all elements fail. When calculating the majority system, probability of its failure is determined by summing the failure probability for two states. And it is assumed that the second refusal is realized in the

previously failed system. Failures of elements that determine the loss of system performance are realized at discrete instants of time, but, with the traditional solution, discreteness is not taken into account. The methodological approach proposed by the authors is based on the notion that, in a stationary process, the failure probability of an element in the operable part of the system is determined by the total density probability of the failure streams of the elements making up this part of the system and their previous generation.

Using the methods proposed by the authors for solving the problems of reliability calculating of these systems, the theorem of multiplying probabilities is not used. Time intervals are determined on which the elements of the system fail, and reduce its efficiency. Taking into account changes in the system structure, solutions are proposed as the failure in it develops.

The results obtained according to the proposed approach strictly correspond to the failure conditions of the systems. The validity of the approach is confirmed by the results of experimental studies. The methods proposed in the work can be used in calculating the reliability of functional systems of aircraft and spacecraft.

Keywords: recoverable system, complex system, the failure probability, density of failure flow of elements, discreteness of failures.

Введение. По принципу поддержания надежности различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы. Функциональные системы, отказы которых приводят к большим потерям, как правило, выполняют и резервированными, и восстанавливаемыми. В авиации восстановление систем в случае отказов их элементов в полете выполняется после посадки. Но за время полета с отказавшим элементом возможны отказы и в остальных резервных подсистемах. В работах [1–3] показано, что авиационные системы вследствие восстановления элементов не стареют более чем на 60 %.

В традиционной теории надежности расчет безотказности систем основан на применении теоремы умножения вероятностей, и в конечной модели отсутствует учет дискретности состояний систем. Это приводит к игнорированию постулата Макса Планка [4] о дискретности состояний систем со всеми вытекающими негативными последствиями. Всестороннее исследование недостатков традиционной теории надежности систем приведено в [5; 6].

В работах [7; 8] предложен подход к расчету безотказности систем без использования теоремы умножения вероятностей, в котором учитывается дискретность состояний систем. Он основан на представлении о том, что вероятность реализации первого отказа в системе определяется суммарным параметром потоков отказов всех элементов, составляющих ее работоспособную часть, и их предшествующей наработкой. На основании подхода разработаны методы для расчета безотказности систем с различным типом резервирования. В [9] приведены результаты экспериментальной проверки разработанных методов. Предлагаемые методы обеспечивают возможность расчета наработок системы, на которых реализуются отказы элементов, и исследование механизмов отказа системы.

Целью данной статьи является анализ моделей развития отказов в функциональных системах при различных подходах.

Механизм развития отказов в системе с параллельным соединением. Рассмотрим моделирование изменения безотказности в невосстанавливаемой системе с параллельным соединением элементов при традиционном [10–13] и предложенном в [7; 8] подходах. Структурная схема системы из пяти параллельно соединенных одинаковых элементов приведена на рис. 1.

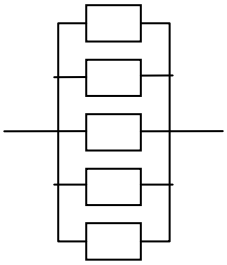


Рис.1. Структурная схема системы с параллельным соединением

Fig.1. The system structural scheme with parallel connection

При традиционном подходе изменение вероятности отказа $Q(t)$ такой системы выразится в виде

$$Q(t) = q(t)^5. \quad (1)$$

При стационарном режиме эксплуатации вероятность отказа элементов $q(t)$ системы допускается моделировать распределением равномерной плотности вида

$$q(t) = \begin{cases} f(t)\cdot t, & \text{где} \quad 0 \le t \le 2T_{\text{ср}}, \\ 1, & \text{где} \quad t \ge 2T_{\text{ср}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $f(t)$ – плотность распределения; $T_{\text{ср}}$ – средняя наработка элемента на отказ (матожидание времени отказа):

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{где} \quad t < 0, \quad t > 2T_{\text{ср}}, \\ \dfrac{1}{2T_{\text{ср}}} = 0{,}5\omega, & \text{где} \quad 0 \le t \le 2T_{\text{ср}}. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда в соответствии с (1)–(3) при стационарном режиме вероятность отказа системы определится как

$$Q(t) = q(t)^5 = (f\cdot t)^5.$$

На рис. 2 штрихпунктирной линией приведена функция распределения вероятности отказа рассматриваемой системы, построенная по выражению (1) с учетом (2).

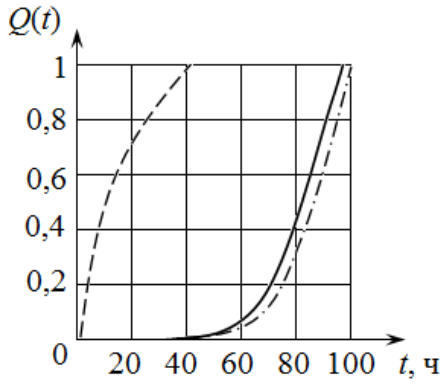


Рис. 2. Функции распределения вероятности отказа системы из 5 параллельно соединенных элементов, построенные при f = 0,001 ч$^{-1}$ (традиционный подход):
——— – экспериментально по методу Монте-Карло;
– – – – экспериментально по методу Монте-Карло для отказа первого элемента; –·–·· – по традиционному методу расчета

Fig. 2. The probability distribution functions for the system failure of 5 parallel-connected elements constructed at f = 0,001 h^{-1}:
——— – experimentally using the Monte-Carlo method;
– – – – experimentally using the Monte-Carlo method for the failure of the first element; –·–·· – according to the traditional method of calculation

Проверка результатов моделирования. Для проверки результатов моделирования расчета по (1) выполнен численный эксперимент методом Монте-Карло по имитации процесса работы системы до отказа [7]. Каждый опыт состоял в задании пяти значений случайных чисел в интервале от 0 до 1, которые отождествлялись с вероятностями отказа элемента. На основании вероятностей по функции распределения $q(t)$ определялись времена отказов. В каждом опыте система отказывает только по достижении последним элементом наибольшей наработки. Выполнено число опытов, достаточное для представительной выборки. По результатам испытаний получен простой статистический ряд наработок. По этой статистике построена функция распределения вероятности отказа системы, приведенная на рис. 2 сплошной линией. Сходимость расчетных и экспериментальных значений более чем удовлетворительная. Вместе с этим остается нераскрытым механизм изменения структуры системы за счет отказов элементов.

Рассмотрим результат такого моделирования. В соответствии с выражением (1) можно сделать вывод, что система отказывает вследствие одновременного отказа всех составляющих ее элементов. Но это далеко не так. Результаты численного моделирования обеспечивают возможность построения функций распределения вероятностей первого, второго, третьего и четвертого отказов в системе. Для примера на рис. 2 пунктирной линией показана функция распределения вероятности первого отказа среди элементов системы. В соответствии с ней первый отказ среди одинаковых элементов реализуется на отрезке [0, 40] часов. Таким образом, очевидно, что при моделировании необходимо учитывать то, что отказ каждого последующего элемента увеличивает вероятность отказа системы и вызывает изменение структуры ее работоспособной части. Но в выражении (1) этот механизм отказа системы никак не отражен. В соответствии с изложенным, функция распределения вероятности отказа, приведенная на рис. 2, является таковой именно для отдельного наиболее надежного элемента системы, но не для самой системы. В пользу этого говорит и тот факт, что плотность вероятности потока отказов в системе в соответствии с (1) близка к 0 на начальном этапе ее работы, когда суммарная плотность потока отказов составляющих ее элементов максимальна.

Таким образом, в системе с параллельным соединением одинаковых элементов при увеличении их числа увеличивается наработка системы до отказа. Это является следствием того, что при выборе элементов из генеральной совокупности наугад увеличивается вероятность появления в структуре системы элемента с наибольшей наработкой до отказа.

Рассмотрим результат моделирования процесса отказов в системе по методу, изложенному в [7; 8]. Вероятность первого отказа в системе (см. рис. 1) определится в виде

$$q_1(t) = f_\Sigma \cdot t, \qquad (4)$$

где f_Σ – суммарная плотность потока отказов элементов. Для рассматриваемой системы $f_\Sigma = 5f$.

Поскольку первый отказ в системе – событие достоверное, то, положив $q_1(t) = 1$, определим верхнюю границу интервала $[0, t_1]$, на котором откажет один из элементов системы. Тогда граница интервала первого отказа в системе выразится как

$$t_1 = \frac{1}{f_\Sigma}. \qquad (5)$$

Вероятность отказа второго элемента определится с учетом изменения структуры и параметра потока отказов как

$$q_2(t) = (f_\Sigma - 1)(t_1 + \Delta t_2), \qquad (6)$$

где $t_2 = t_1 + \Delta t_2$ – граница интервала $[0, t_2]$, на котором откажет второй элемент.

Положив $q_2(t) = 1$, определим

$$\Delta t_2 = \frac{1 - t_1\left(f_\Sigma - 1\right)}{f_\Sigma - 1}. \qquad (7)$$

Продолжив процедуру, определим отрезки Δt_3, Δt_4 и Δt_5, а также верхние границы t_3, t_4 и t_5 отрезков $[0, t_3]$, $[0, t_4]$ и $[0, t_5]$, на которых реализуются последующие отказы элементов.

С другой стороны, поскольку отказ каждого элемента увеличивает вероятность отказа системы на 0,2, то полученные времена обеспечивают возможность построить функцию распределения вероятности отказа системы, приведенную на рис. 3 сплошной линией. Там же пунктирной линией приведена функция распределения, построенная по статистике выполненного численного эксперимента.

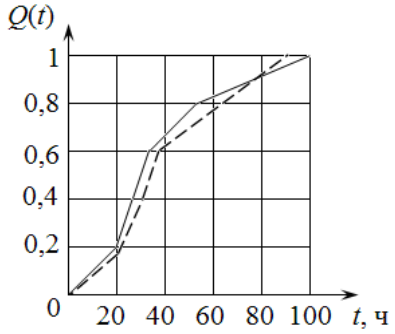


Рис. 3. Функции распределения вероятности отказа системы из 5 параллельно соединенных элементов, построенные при $f = 0{,}001$ ч$^{-1}$:
——— – расчет по методу без использования теоремы умножения вероятностей;
– – – – эксперимент по методу Монте-Карло

Fig. 3. The probability distribution functions for the system failure of 5 parallel-connected elements constructed at $f = 0{,}001$ h^{-1}:
——— – calculation by the method without using the theorem of probabilities multiplication;
– – – – Monte-Carlo experiment

Приведенные результаты показывают, это система может находиться в дискретных состояниях, исправном, неисправных, но работоспособных и в состоянии отказа. Состояния разделены дискретными событиями отказов элементов. Такое представление строго соответствует постулатам М. Планка [4]. Таким образом, при увеличении числа элементов в системе с раздельным резервированием ее наработка до отказа увеличивается вследствие увеличения вероятности, при выборе наугад, реализации в ее структуре элемента с наибольшей надежностью.

Механизм развития отказов в восстанавливаемых системах. Перейдем к рассмотрению восстанавливаемых резервированных систем. Механизм формирования отказов в восстанавливаемых системах существенно отличается. Рассмотрим результаты лабораторных ускоренных испытаний системы, приведенной на рис. 4 [9].

В качестве элементов использовались лампы накаливания. Ускорение режима испытания достигалось увеличением напряжения питания ламп. Перегоревшие лампы заменялись не сразу, а после некоторого времени для имитации времени полета с отказом в системе. Время полета с отказом $T_{ПО}$ принималось равным 4 мин. После установления стационарного режима отказов и замен ламп выполнена серия зачетных испытаний. Статистика испытаний обеспечила возможность определить плотность вероятности отказа ламп $f = 0{,}0159$ мин$^{-1}$ и построить функцию распределения вероятности отказа системы, приведенную на рис. 5 сплошной линией.

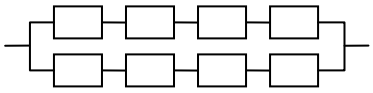


Рис. 4. Структурная схема системы с последовательным соединением

Fig. 4. The system structural scheme with serial connection

По разработанному в [8; 9; 14] методу, задавая возрастающий ряд значений вероятностей отказов элементов от 0 до 1, рассчитывались верхние границы интервалов $[0, t_1]$ и $[t_1, t_2^{вос}]$ времени отказов первой и второй лампы за время полета с отказом. Здесь $t_2^{вос}$ – верхняя граница интервала, на котором отказывает восстанавливаемая система. Рассчитанные значения вероятности отказа системы показаны на рис. 5 пунктирной линией. Экспериментальная и расчетная функции представляются гладкими кривыми. При этом складывается впечатление о невыполнении постулата М. Планка. Здесь следует иметь в виду, что они построены по значениям наработок до отказа системы, т. е. по $t_2^{вос}$. Если в расчете сразу положить $q(t) = 1$, то будет построена функция, приведенная на рис. 5 штрихпунктирной линией. При уменьшении $q(t)$ значения $t_2^{вос}$ этой функции опишут пунктирную линию, и каждому из них будут соответствовать значения t_1 верхней границы отказа первого элемента.

Напомним, что в надежности известны два основных плана испытания элементов. Это планы испытания невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов. Формы функций распределения вероятности отказов, соответствующие этим планам, приведены на рис. 6 [15].

При обоих указанных планах испытаний элементы отказывают вследствие износа (старение, деградация). Там же, на рис. 6, штрихпунктирной линией показана форма плотности вероятности восстанавливаемой (нестареющей) системы, соответствующей функции распределения на рис. 5.

Функция распределения восстанавливаемой системы (рис. 5) в теории и практике надежности получена впервые. Отказы таких систем не могут быть объяснены деградационными процессами. С деградацией связаны отказы элементов, но не восстанавливаемых систем [16; 17].

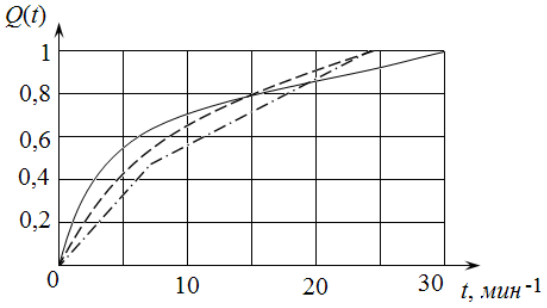


Рис. 5. Функции распределения вероятности отказа восстанавливаемой системы:
——— – эксперимент;
– – – – традиционный расчет;
–·–·· – расчет по методу [6; 7]

Fig. 5. The probability distribution function for the failure of the restored system:
——— – experiment;
– – – – traditional calculation;,
–·–·· – calculation by the method [6; 7]

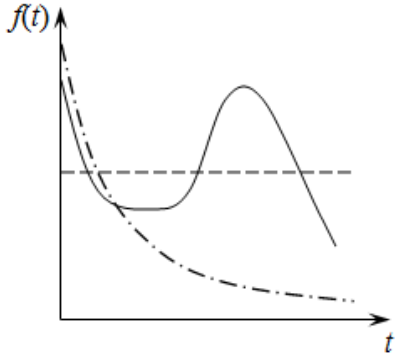


Рис. 6. Форма изменения плотностей вероятностей при испытаниях:
——— – план невосстанавливаемых объектов;
– – – – план восстанавливаемых объектов;
–·–·· – для восстанавливаемой системы

Fig. 6. The form of the change in the probability densities during testing:
——— – plan of non-renewable objects;
– – – – the plan of the restored objects;
–·–·· – for the rescue system

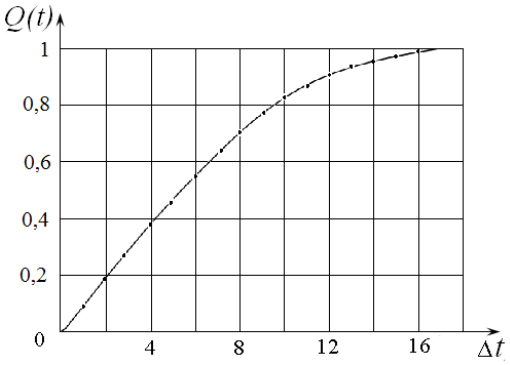


Рис. 7. Функция распределения вероятности отказов системы от протяженности отрезков между точками отказов ламп в системе

Fig. 7. The probability distribution function of system failures from the length of segments between the failure points of lamps in the system

Заключение. Механизм отказа нестареющих систем определяется двумя процессами. Первый процесс связан со случайным характером моментов времени отказов элементов в подсистемах, образующих систему. При этом временные интервалы между точками отказов элементов в подсистемах в процессе работы изменяются и смещаются друг относительно друга. Когда временной интервал между последовательными отказами элементов в подсистемах становится меньше времени $T_{ПО}$, реализуется отказ системы.

Второй процесс, определяющий характер изменения вероятности отказа системы $Q(t)$ от времени, является следствием распределения различных протяженностей отрезков времени между отказами элементов. Функция распределения вероятности $Q(t)$ от протяженности отрезков времени между точками отказов ламп в рассматриваемой системе приведена на рис. 7. Из рис. 7 совершенно очевидно, что по мере увеличения протяженности отрезков между точками отказов ламп плотность вероятности существенно уменьшается. Следовательно, отрезков меньшей длины существенно больше, чем отрезков большей длины. По этой причине плотность вероятности отказа системы уменьшается по мере увеличения наработки. В конечном счете, это приводит к уменьшению математического ожидания времени до отказа системы. Несмотря на это негативное следствие, надежность восстанавливаемых систем по сравнению с невосстанавливаемыми многократно возрастает с уменьшением $T_{ПО}$ и увеличением кратности резервирования.

Библиографические ссылки

1. Зосимов А. Г., Медведев В. Л., Шаймарданов Л. Г. Надежность функциональных систем длительно эксплуатирующихся самолетов гражданской авиации // Вестник СибГАУ. 2006. № 6(13). С. 107–112.

2. Утенков П. Г., Шаймарданов Л. Г. Особенности старения одноименных систем различных типов самолетов // Решетневские чтения : материалы XII Междунар. науч. конф. (10–12 нояб. 2008, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. С. 178–179.

3. Шаймарданов Л. Г. Некоторые проблемы безопасности полетов и состояния самолетного парка гражданской авиации // Вестник СибГАУ. 2007 № 1(14). С. 84–87.

4. Tribus M. Thermostatics and Thermodynamics. An Introduction to Energy, Information and States of Matter, with Engineering Applications. Princeton, New Jersey : D. Van Nostrand Company Publ., 1965. 504 p.

5. Бойко О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : монография. М. : РАН, 2009. 119 с.

6. Теория вероятностей : учебник для вузов / А. В. Печкин [и др.] ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 456 с.

7. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Использование метода Монте-Карло для моделирования процесса изменения безотказности восстанавливаемых систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 1. С. 100–104.

8. Shaimardanov L. G., Boyko O. G. New approach to reliability estimation of functional systems for civil aviation aircrafts. International Russian-American Scientific // Actual problems of aviation and aerospace systems. 2012. Vol. 17, No. 2(35). P. 28–33.

9. Бойко О. Г., Фурманова Е. А., Шаймарданов Л. Г. Экспериментальное исследование процесса изменения надежности восстанавливаемых систем // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума. В 2 т. Т. 1. Пенза : ПГУ, 2014. С. 87–90.

10. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М. : Наука, 1965. 524 с.

11. Bazovsky I. Reliability. Theory and practice. London : Prentice-Hall International Publ., 1961. 373 p.

12. Сугак Е. В. Надежность технических систем. Красноярск : Раско, 2001. 608 с.

13. Truelove A. J. Strategic reliability and preventive maintenance // Operations Res. 1961. Vol. 9, № 1. P. 22–29.

14. Фурманова Е. А., Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. К вопросу о моделировании процесса отказов–восстановлений в функциональных системах самолетов гражданской авиации // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. IV Всерос. научн.-техн. конф. Иркутск : ИрГТУ, 2014. С. 154–162.

15. Воробьев В. Г., Константинов В. Д. Надежность и эффективность авиационного оборудования. М. : Транспорт, 1995. 245 с.

16. Шаймарданов Л. Г. Метод расчета надежности авиационных систем с индивидуальным резервированием агрегатов // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 106–110.

17. Шаймарданов Л. Г. О правомерности использования условных вероятностей безотказной работы и условных плотностей вероятностей отказов в математических моделях надежности агрегатов // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 113–116.

References

1. Zosimov A. G. Medvedev V. L. Shaimardanov L. G. [Reliability of functional systems of long-term civil aviation aircraft]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 6(13), P. 107–112 (In Russ.).

2. Utenkov P. G., Shaimardanov L.G. [Aging features of similar systems of different aircraft types]. *Materialy XII Mezhdunar. nauch. konf. “Reshetnevskie chteniya”* [Materials XV Intern. Scientific. Conf “Reshetnev readings”]. Krasnoyarsk, 2008, P. 178–179 (In Russ.).

3. Shaimardanov L. G. [Some problems of flight safety and the state of the aircraft fleet of civil aviation]. *Vestnik SibGAU*. 2007, No. 1(14), P. 84–87 (In Russ.).

4. Tribus M. Thermostatics and Thermodynamics. An Introduction to Energy, Information and States of Matter, with Engineering Applications. Princeton, New Jersey, D. Van Nostrand Company Publ., 1965, 504 p.

5. Boyko O. G. *Nadezhnost’ funktsional’nykh sistem samoletov grazhdanskoi aviatsii: monografiya* [Reliability of civil aviation aircraft functional systems: monograph]. Moscow, RAN, 2009, 119 p.

6. Pechkin A. V., Teskin O. I., Tsvetkova G. M. *Teoriya veroyatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Bauman MGTU Publ., 2004, 456 p.

7. Boyko O. G., Shaimardanov L. G. [Using the Monte-Carlo method to simulate the process of changing the reliability of recoverable systems]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin.* 2016, No. 1, P. 100–104 (In Russ.).

8. Shaimardanov L. G., Boyko O. G. New approach to reliability estimation of functional systems for civil aviation aircrafts. International Russian-American Scientific *Actual problems of aviation and aerospace systems*. 2012, Vol. 17, No. 2(35), P. 28–33.

9. Boyko O. G., Furmanova E. A., Shaimardanov L. G. [Methodological approach and methods for assessing the likelihood of catastrophes due to failures of aircraft functional systems]. *Trudy Mezhdunar. simpozium "Nadezhnost' i kachestvo"* [Materials of the Intern. Symposium "Reliability and quality"]. 2014, Vol. 1, P. 84–87.

10. Gnedenko B. V. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskii analiz* [Mathematical methods in reliability theory. Basic characteristics of reliability and their statistical analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 524 p.

11. Bazovsky I. Reliability. Theory and practice. London, Prentice-Hall International Publ., 1961, 373 p.

12. Sugak E. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh system* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, Rasko Publ., 2001, 608 p.

13. Truelove A. J. Strategic reliability and preventive maintenance. *Operations Res.* 1961, Vol. 9, No. 1, P. 22–29.

14. Furmanova E. A. Boyko O. G., Shaimardanov L. G. [On the issue of modeling the failure-recovery process in the functional systems of civil aviation aircraft]. *Sb. statei IV Vseros. nauchn.-tekhn. konf. "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Materials of the IV All-Russian Scientific and Technical Conf. "Aircraft Engineering and Transportation of Siberia"]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2014, P. 154–162 (In Russ.).

15. Vorob'ev V. G., Konstantinov V. D. *Nadezhnost' i effektivnost' aviatsionnogo oborudovaniya* [Reliability and efficiency of aviation equipment]. Moscow, Transport Publ., 1995, 245 p.

16. Shaimardanov L. G. [Method for calculating the reliability of aviation systems with individual redundancy of aggregates]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2(28), P. 106–100 (In Russ.).

17. Shaimardanov L. G. [On the legitimacy conditional probability using of failure-free operation and conditional probability density of failures in aggregates reliability mathematical models]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2(28), P. 113–116 (In Russ.).

© Бойко О. Г., Ачкасова Е. А., 2017

UDC 629.7.016

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 841–850

METHODOLOGY AND PROGRAM COMPLEX OF RESEARCH OF LONGITUDINAL STATIC SUSTAINABILITY OF SCREENPLANE AT THE DESIGN STAGE

J. F. Vshivkov, S. M. Krivel*

Irkutsk State University
1, Karl Marx Str., Irkutsk, 664003, Russian Federation
*E-mail: krivel66@mail.ru

This paper deals with the research methods of wing-in-ground effect vehicle (WIG vehicle) longitudinal static stability. The methods are focused on the use of the algorithm of preliminary WIG aerodynamics and control system design. The algorithm is based on the iteration process of stability criteria calculations, the subsequent factor analysis of these criteria with respect to their value-determining parameters and variations of WIG vehicle configuration parameters. The methods include preliminary determination of WIG vehicle aerodynamic characteristics. The best results can be obtained when different methods of determining these aerodynamic characteristics (experimental and by means of computational aerodynamics) are combined. In this paper the calculation of aerodynamic characteristics is performed by applying ANSYS software packet. To assess the reliability of the aerodynamic characteristics obtained with the ANSYS program, experimental studies in a wind tunnel and a vertical hydrodynamic pipe were carried out. Certain aerodynamic characteristics are determined by means of originally made computer programs using the method of discrete vortices. A special database is formed of the obtained aerodynamic characteristics. The database essentially is a mathematical model of a WIG vehicle which supplies the characteristics (aerodynamic coefficients and their derivatives) with an estimated degree of reliability within a given range of determining parameters. On the basis of the widely used criterial approach to static stability assessment of various WIG vehicle modifications, a mathematical algorithm for parameter calculation and a computer program were developed. They permit the calculation-based analysis of the factors determining stability or non-stability of a WIG vehicle. The mathematical model of WIG vehicle stability analysis is implemented in the form of a software packet based on MatLab. The results worked out by the program are in the form of data suitable for operational analysis. Using these data, one can assess the WIG vehicle static stability and determine the stability range for the given structural and configurational factors. The results of the analysis make a foundation for subsequent modifications of WIG vehicle's aerodynamic configuration or for working out requirements for automatic control and stabilizing systems' upgrade. The methods demonstrating the analysis of original load-carrying systems design are also presented. For the example analysis, an original WIG- tandem load-carrying system was chosen. The methods are applicable for the analysis of various aircraft modes' stability, for all vehicles built on aerodynamic principles of flight maintenance.

Keywords: WIG vehicle, ground-effect vehicle, WIG vehicle stability, longitudinal static stability, WIG-craft design, flight dynamics.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 841–850

МЕТОДИКА И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКРАНОПЛАНА НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ю. Ф. Вшивков, С. М. Кривель*

Иркутский государственный университет
Российская Федерация, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1
*E-mail: krivel66@mail.ru

Рассматривается методика исследования продольной статической устойчивости экраноплана. Методика ориентирована на использование в качестве составляющего элемента алгоритма предварительного аэродинамического проектирования экраноплана и его системы управления. В основу алгоритма положен итерационный процесс расчета критериев устойчивости, последующих факторного анализа этих критериев по отношению к определяющим их значения параметрам и изменения компоновочных параметров экраноплана. Методика предполагает предварительное определение аэродинамических характеристик экраноплана. Наилучшие результаты дает совместное использование различных методов определения аэродинамических характеристик (экспериментальных и методов вычислительной аэродинамики). В рамках настоящей статьи расчет аэродинамических характеристик выполняется с использованием программного комплекса ANSYS. Для оценки достоверности полученных аэродинамических характеристик в программе ANSYS были выполнены экспериментальные

исследования в аэродинамической трубе и вертикальной гидродинамической трубе. Ряд аэродинамических характеристик определяется с применением авторских программ для ЭВМ с использованием метода дискретных вихрей. На основе полученных аэродинамических характеристик формируется база данных. База данных по своей сути представляет математическую модель экраноплана, которая позволяет получить характеристики (аэродинамические коэффициенты и их производные) с оцененной степенью достоверности в заданном диапазоне определяющих параметров. На основе известного критериального подхода оценки статической устойчивости экраноплана и его модификации разработан математический алгоритм расчета параметров и программа для ЭВМ, позволяющие по полученным результатам расчета производить анализ определяющих устойчивость или неустойчивость экраноплана факторов. Математическая модель анализа устойчивости экраноплана реализована в виде программного комплекса на основе MatLab. Результатом работы программы являются представленные в удобном для оперативного анализа виде данные, на основе которых пользователь оценивает статическую устойчивость экраноплана и определяет область устойчивости с учетом текущих конструктивно-компоновочных факторов. Результаты анализа являются основанием для последующего внесения изменений в аэродинамическую компоновку или разработки требований к автоматической системе улучшения устойчивости и управляемости экраноплана. Представлены демонстрирующие методику результаты исследований оригинальной компоновки несущей системы экраноплана. В качестве объекта исследования была выбрана оригинальная несущая система экраноплана схемы «тандем». Методика применима для исследования устойчивости экранолетов и других летательных аппаратов, использующих аэродинамические принципы поддержания в полете.

Ключевые слова: экраноплан, экранолет, устойчивость экраноплана, проектирование экраноплана, динамика полета.

Introduction. Design of wing-in-ground effect vehicles (WIG vehicles) with pre-determined stability and controllability characteristics is a complex and topical task. The requirements of their stability and controllability are more demanding as compared to the design standards of other aircraft with comparable aerodynamic characteristics, such as airplanes. That is determined by the demands of flight safety, as WIG vehicles fly at a high speed and quite close to the water or ground surface. WIG-craft handling qualities (either set initially or specified by an automatic flight monitoring system) must provide fine control of flight and the craft's specified alignment with the underlying surface within the given flight envelope. Besides, WIG vehicles' aerodynamic characteristics (aerodynamic coefficients and their derivatives) depend on the distance of the given distinguished point of the craft (in this paper – the center of mass) from the underlying surface, and on the position of the center of mass as the point of the aircraft rotation. Unlike with airplanes, here the range of significant influence of these factors corresponds to the main operational range of WIG vehicles' flight parameters. It is difficult to overestimate the importance of solving the problem of specifying the stability and controllability characteristics of the craft at the preliminary design stage, as the correction of design errors in aerodynamic configuration of the aircraft can't be fully completed at subsequent design stages. That is why the article deals with the problem so urgent for the development of aircraft engineering.

Subject of research. The purpose is to work out methods and a packet of computer programs for assessing the WIG vehicle static stability at the stage of preliminary design using mathematical modeling and method studies. These can help to assess the applicability of the methods and programs offered for WIG-craft aerodynamic design. Note: the ideology of mathematical modeling of WIG vehicle flight dynamics this paper is based on is acquired from Ref. [1], the aerodynamics and motion designations and parameter structuring are specified in accordance with Ref. [1–3].

It is known that an aircraft (WIG vehicle, airplane, etc.) is statically stable with respect to one of the parameters, if its changing causes force factors (forces or moments) that tend to eliminate the increment of this parameter. Longitudinal static stability specifically shows itself in longitudinal motion, i. e. when the aircraft is moving along its own symmetry plane. This paper defines the longitudinal static stability of WIG vehicle as the static stability of its two parameters: the angle of attack (pitch) and the altitude of flight above the ground-effect plane (distance). The longitudinal stability characteristics of a WIG vehicle is determined by two groups of factors. The first group is determined by the aerodynamic and mass configuration of the aircraft. The second group includes the initial flight mode parameters, the center of mass location, the flying weight and other variable parameters [3–5].

Calculation methods of longitudinal stability parameters. Characteristics of the program packet. A lot of works are devoted to solving the problem of providing WIG-craft stability in longitudinal motion, the most essential being the works of R. D. Irodov and V. I. Zhukov [6; 7]. They offer a criterial approach to WIG vehicle stability assessment based on the analysis of the angle of attack and distance from the ground-effect plane. It should be noted that in most works devoted to the assessment of WIG vehicle stability, including those published abroad, the same approach is either applied or developed (Ref. [8–10]).

In this paper, two approaches are used to evaluate WIG static stability in longitudinal motion.

The first is based on the theoretical propositions of Ref. [6].

This paper analyses the basic system of equations describing WIG vehicle longitudinal motion, which does not differ in form from the equations used for airplane parameters calculations and is in the same form as in Ref. [1; 3]:

$$\frac{dV}{dt} = g(n_{x_a} - \sin\theta),$$
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V}(n_{y_a} - \cos\theta),$$
$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} = \frac{M_z}{I_z}, \qquad (1)$$
$$\frac{d\bar{h}}{dt} = V\sin\theta.$$

Here g – is free fall acceleration; n_{x_a} and n_{y_a} – tangential and normal high-speed overload respectively; t – time; V – true airspeed (in case of the absence of airflow velocity along the underlying surface); θ – flight path slope angle; ϑ – pitch angle; $\bar{h}$ – flight altitude (relative distance from the ground-effect plane, distance from the aircraft's center of mass to the ground-effect plane); M_z – longitudinal moment.

With certain assumptions, the terms of aperiodic and oscillation stability of WIG vehicle were obtained. As on the cruiser flight modes $c_y^{\bar{h}} < 0,\ c_y^{\alpha} > 0$ (lift coefficient derivatives according to the distance and the angle of attack respectively), the stability criteria can be described as:

$$\left.\frac{dm_z}{d\alpha}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}} < 0;\ \left.\frac{dm_z}{d\bar{h}}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}} < 0, \qquad (2)$$

where $c_{y_a\,\text{ГП}}$ – lift coefficient for stable horizontal flight; m_z – WIG vehicle longitudinal moment coefficient. WIG vehicle is regarded as stable when $m_z^{\alpha} < 0$ or $m_z^{\bar{h}} < 0$ (longitudinal moment coefficient derivatives m_z with respect to the angle of attack α and distance $\bar{h}$ respectively) when $c_{y_a} = \text{const} = c_{y_a\,\text{ГП}}$.

In accordance with this approach to evaluation of WIG craft static stability the following mathematical algorithm of derivatives calculation was worked out $m_z^{\alpha} = \left.\frac{dm_z}{d\alpha}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}}$ и $m_z^{\bar{h}} = \left.\frac{dm_z}{d\bar{h}}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}}$ (fig. 1).

On the block diagram fig. 1: x_T – current center of mass location of the aircraft under consideration; $\bar{h}$ – specified relative distance from the ground-effect plane; c_{y_a} – specified lift coefficient for stable horizontal flight; $\alpha_{\text{ГП}}$ – angle of attack for horizontal flight with the specified parameters; $\bar{h}_{\text{ГП}}$ – relative distances calculated with corresponding value of c_{y_a}; m_z – longitudinal moment coefficient calculated for corresponding to the angle of attack and the distance in horizontal flight ($\alpha_{\text{ГП}}$ и $\bar{h}_{\text{ГП}}$).

The complex of aerodynamic characteristics is determined with the help of ANSYS software packet. To estimate the range of kinematics parameters of ANSYS applicability to solving the given problems and the reliability of the results the model yields, a methodical research was done based on comparing the results of the calculations with the experimental data and modelling results obtained in researches of other authors [11–13]. Aerodynamic characteristics are presented as a mathematical model, describing dependences of aerodynamic coefficients on the parameters of flight and WIG vehicle configuration based on multidimensional approximation of data by exponential polynomials. The derivatives of aerodynamic coefficients with respect to the given parameters are determined by methods of numerical differentiation.

The second approach is classic for the aircraft of airplane type, where longitudinal static stability is essentially understood as stability with respect to the angle of attack in low-speed longitudinal motion; it also depends on the center-of-gravity positioning of the aircraft [1–3]. In this case, the aircraft is stable under condition of $\frac{dm_z}{d\alpha} < 0$. The simplified approach is dictated by the necessity of WIG- craft's static stability evaluation when it moves out of (or with negligible) wing-in-ground effect. Application of the first approach at a considerable distance from the effect plane often gives rather contradictory results of stability evaluation. Besides, certain examples of analysis of some aerodynamic configurations bring to conclusion that in several cases the simplified (second) approach to longitudinal stability evaluation within the total range of distances from the underlying surface is enough. In this case stability evaluation is made when the following conditions coincide: $m_z^{\alpha} < 0$ и $m_z^{\bar{h}} < 0$ (with no condition $c_{y_a} = \text{const}$ set up).

If the criteria $m_z^{\alpha} < 0$ and $m_z^{\bar{h}} < 0$ are not synchronized, it means that the aerodynamic configuration of WIG vehicle doesn't provide its longitudinal static stability.

MatLab system and its Guide application are used as a mathematical modelling platform, allowing to work out original applications for Windows. Aerobatic 1.0 program application was made on this basis (fig. 2).

The program presents a multi-window structure interface, which allows step-by-step problem solving:

1. Formation of aerodynamic characteristics database for the aircraft under study. Stating the special task for analysis (when it is necessary to analyse several independent configurations or configurations derived one from the other) (fig. 3).

2. Analysis of the aircraft aerodynamic characteristics using visualization methods and mathematical modelling of its aerodynamics by means of data processing, calculation of secondary aerodynamic characteristics and derivative aerodynamic coefficients within the given working process [1].

3. Stating the succession of calculations and initial data (fig. 4.) The program allows to calculate and make mathematical experiments both within the program and using other external software (for example, an optimization program packet).

4. Analysis of modelling results based on multi-variant presentation of results in numerical terms along with visualization methods, including the analysis of separate configuration components within the range of generalized results (for example, within stability criteria values).

Methods and results of longitudinal stability estimation. The subject of research is a non-standard WIG

vehicle configuration. The given configuration is of two load-carrying surfaces mounted one behind the other in a tandem (fig. 5). The front wing – trapezoidal, swept at the leading edge, flat, of a relatively thing section – makes a small rigging angle of incidence with the longitudinal axis of the aircraft. The back wing – with a straight leading edge, swept back at the trailing edge – has a considerable rigging angle and is of an anhedral wing angle. The back wing is dome-shaped, and its trailing edge lies in the same plane. The horizontal tail of rectangular form is mounted in this configuration with a considerable elevation as to the load-carrying system of front and back wings.

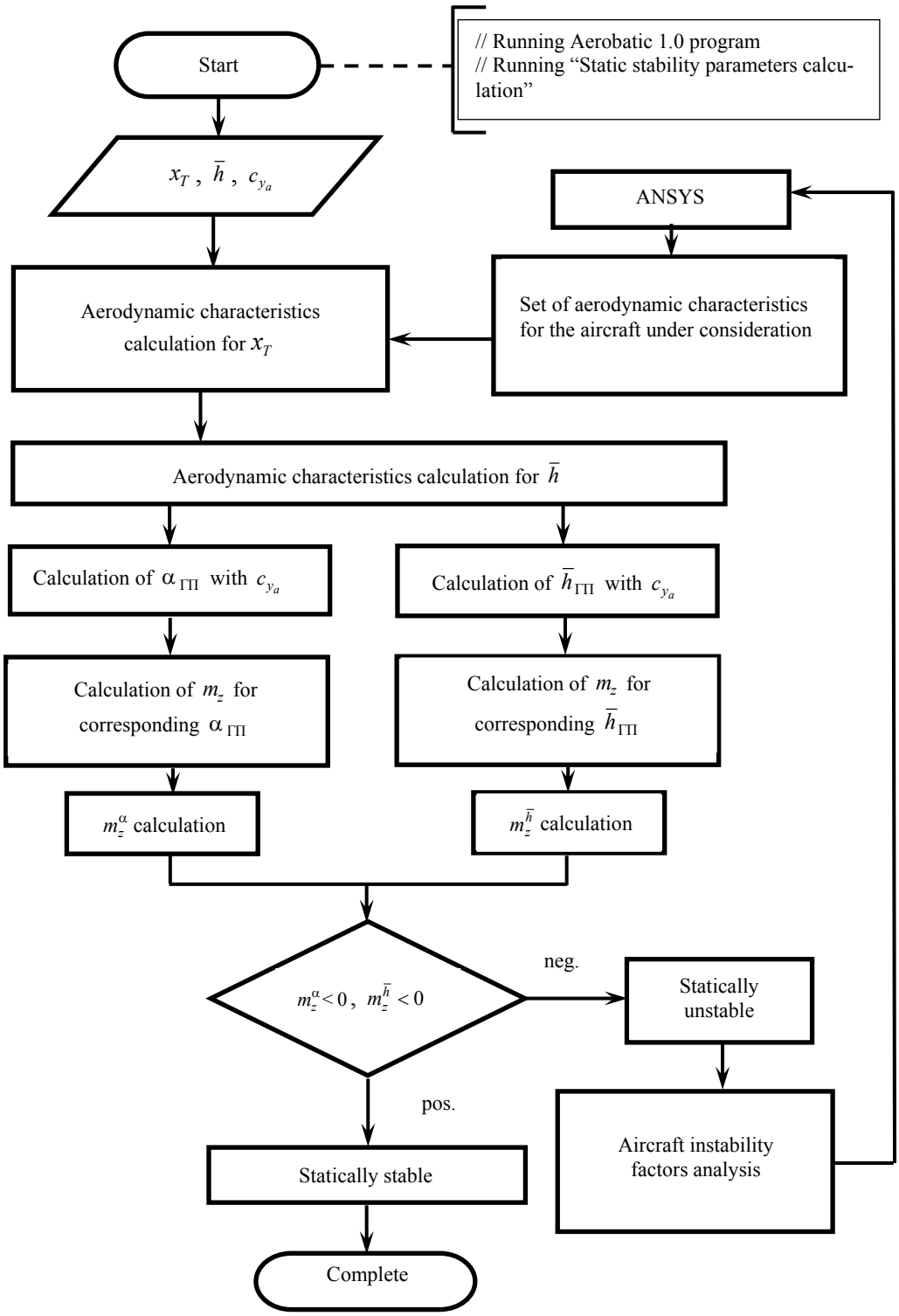


Fig. 1. Block diagram of m_z^{α} и $m_z^{\bar{h}}$ calculation when $c_{y_a} = \text{const}$

Рис. 1. Блок-схема расчета m_z^{α} и $m_z^{\bar{h}}$ для случая $c_{y_a} = \text{const}$

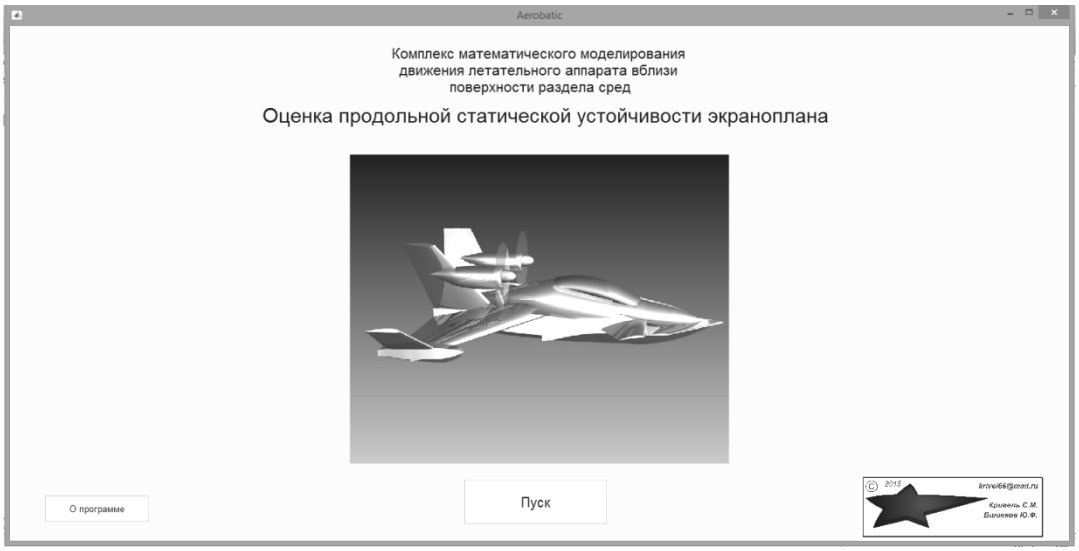


Fig. 2. Aerobatic 1.0 starting window

Рис. 2. Стартовое окно программы Aerobatic 1.0

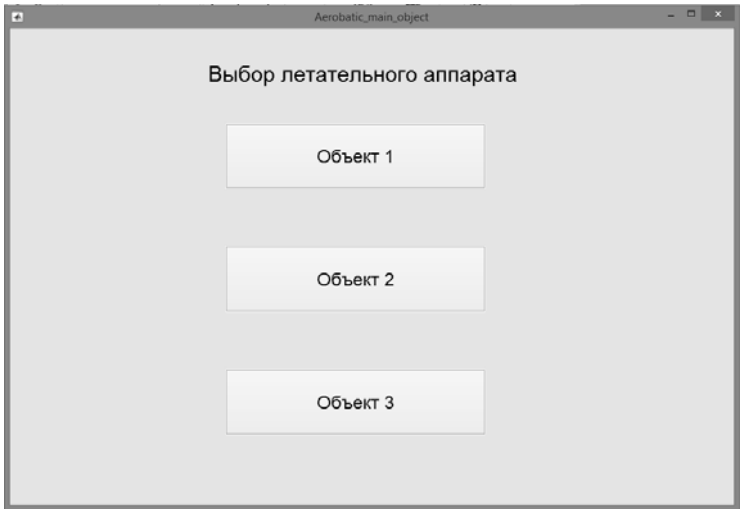


Fig. 3. Window of the analyzed object choice

Рис. 3. Окно выбора объекта исследования

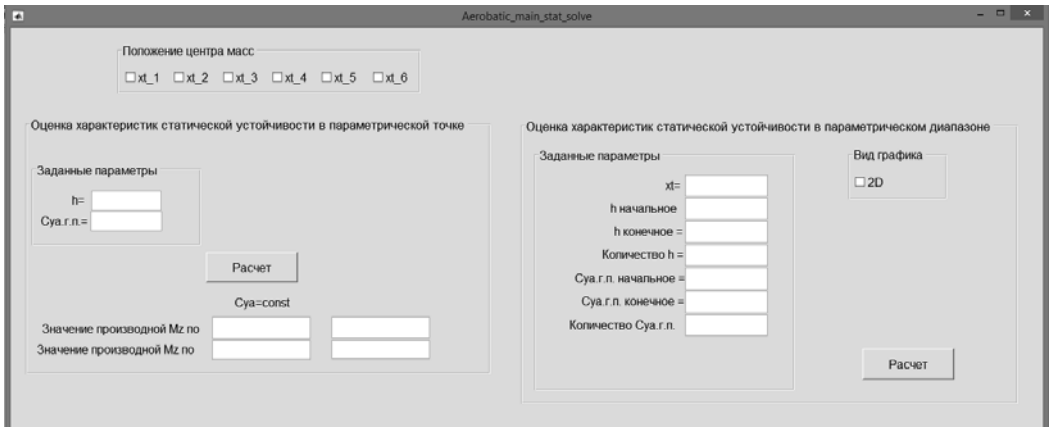


Fig. 4. The main processing window for calculation and feeding the initial data

Рис. 4. Основное управляющее окно порядка выполнения расчетов и задания исходных данных

It should be noted that m_z^{α} и $m_z^{\bar{h}}$ parameters for the set configuration are determined by the flight parameters and the center of mass location. Here the character of dependence of longitudinal moment coefficient on the angle of attack $m_z(\alpha)$ and distance $m_z\left(\bar{h}\right)$ differs qualitatively (fig. 6, 7). We can conclude that the sign of the derivative m_z^{α} in case $c_{y_a} = \text{const}$ is specifically determined by the order of $m_z(\alpha)$ variation in "correction" of the distance $\bar{h}$. "Correction" of the distance $\bar{h}$ is determined by the necessity to keep $c_{y_a} = \text{const}$ when changing the angle of attack α. The increase of the angle of attack α (increase of c_{y_a}) demands the corresponding increase of the distance $\bar{h}$ (decrease of c_{y_a}). This setting can be illustrated by the following example (fig. 8). Setting the lift coefficient $c_{y_a} = 0.56$ (the diagram above) results in the longitudinal moment coefficient m_z increase with the angle of attack α increase (the diagram below). This can be explained by the fact that the increase rate of m_z due to the unavoidable "correction" of distance $\bar{h}$ (its increase) is higher than the decrease rate of m_z due to the increase of the angle of attack α. For the example given $m_z(\alpha) > 0$, that means that the WIG vehicle is statically unstable in longitudinal motion when $c_{y_a} = 0.56$.

The results of the modelling outline the static stability and instability ranges of WIG vehicle (fig. 9). The range of parameters within which the stability of WIG vehicle can be sustained is limited both by extreme aft and forward center-of-gravity position. Stability is provided within a narrow range of center-of-gravity and flight parameters. Application of stability criteria in the form (2), considering that the implementation of one of the conditions – $m_z^{\alpha} < 0$ or $m_z^{\bar{h}} < 0$ – is enough, logically results in the necessity of implementation of both conditions. The given setting can be used as an instrument of modelling quality control and is illustrated by the data of fig. 9.

However, the application of stability criteria (2) at distances greater than 1 (at distances of low wing-in-ground effect influence on WIG vehicle aerodynamic characteristics) doesn't correspond to the results of using the simplified approach based on the stability criterion $m_z^{\alpha} < 0$.

The representation of the static stability conditions in the form [5] is more informative from the point of view of WIG vehicle aerodynamic configuration analysis:

$$\bar{x}_{F\bar{h}} - \bar{x}_{F\alpha} < 0, \qquad (3)$$

where $\bar{x}_{F\bar{h}}, \bar{x}_{F\alpha}$ are the angle-of-attack and distance foci coordinates.

The results of basic configuration modelling of the load-carrying system are shown in fig. 10. It is obvious that the location of the distance focus $\bar{x}_{F\bar{h}}$ doesn't depend on the center of mass location. The location of the angle-of-attack focus $\bar{x}_{F\alpha}$ considerably depends on the center of mass location, as it is the WIG vehicle rotation point. The rotation point location determines the WIG vehicle attitude to the underlying surface when the angle of attack (and the aerodynamic characteristics) are changed. In a certain sense, the model data bring to conclusion that the WIG vehicle's center-of gravity location control does not allow effective influence on the aircraft stability in longitudinal motion and specifically on the range of stable modes of flight. However, the position of the center of mass can have a significant effect on the range of WIG vehicle static stability in respect to the angle of attack, which in turn determines the parameters of the aircraft perturbed motion.

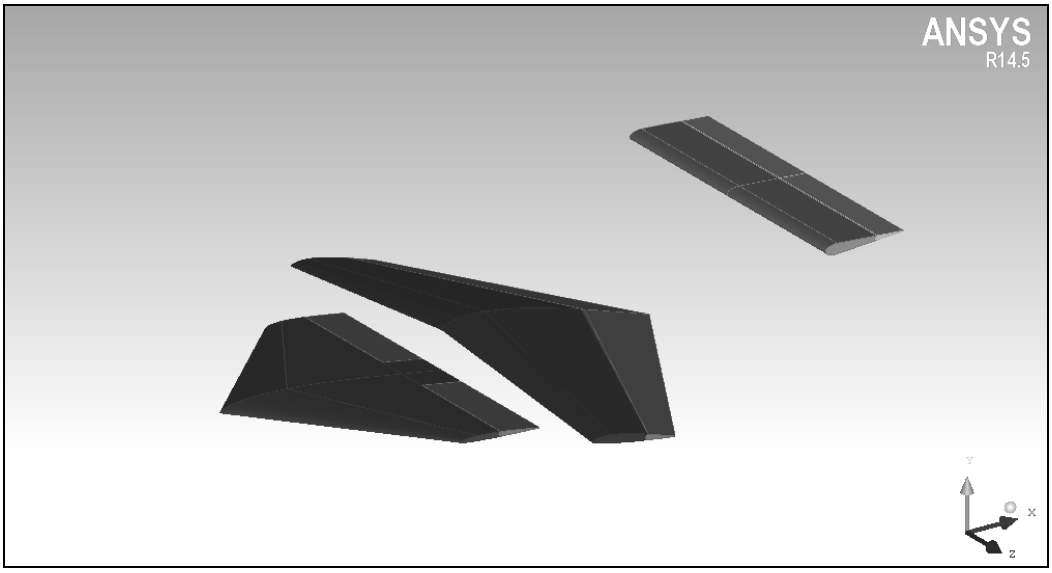


Fig. 5. General configuration in cross-section

Рис. 5. Общий вид компоновки в плане

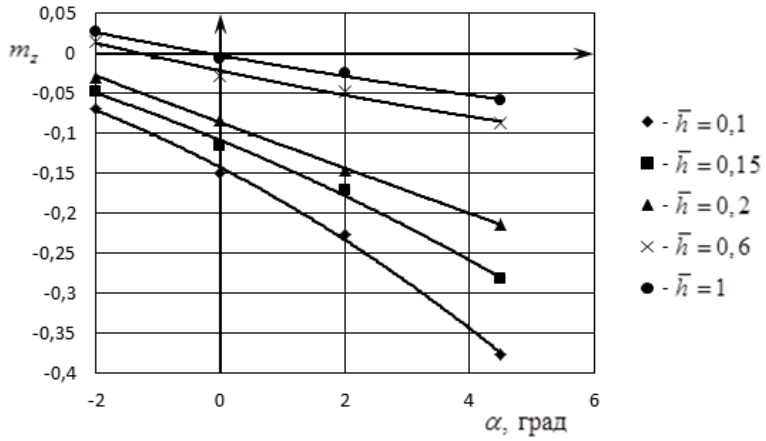


Fig. 6. Dependence of longitudinal moment coefficient on the angle of attack $m_z(\alpha)$ for varied distances $\bar{h}$ (extreme forward center – of-gravity)

Рис. 6. Зависимость коэффициента продольного момента от угла атаки $m_z(\alpha)$ для различных отстояний $\bar{h}$ (центровка – предельно передняя)

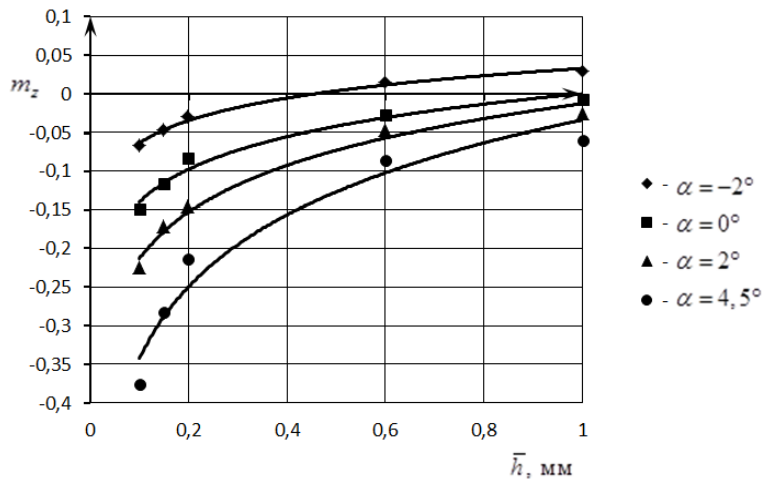


Fig. 7. Dependence of longitudinal moment coefficient $m_z(\bar{h})$ on the distance $\bar{h}$ for varied angles of attack α (extreme forward center – of-gravity)

Рис. 7. Зависимость коэффициента продольного момента $m_z(\bar{h})$ от отстояния $\bar{h}$ для различных углов атаки α (центровка – предельно передняя)

Conclusion. It is obvious that the analysis of the WIG vehicle longitudinal static stability alone based on the criterial approach has a rather conventional practical significance for several reasons. First, the problem of determining the best (optimal, rational, etc.) relative position of the center of mass, foci of the angle of attack and distance, even when the requirements of static stability are fulfilled, remains a subject of investigation and of scientific publications' argument (examples in [8–10]. Second, perturbed motion of WIG vehicle with the relatively intensive change of distance and, accordingly, change of aerodynamic characteristics and parameters, including static stability (fig. 10) result in the necessity of solving the stability evaluation problem using simulation models of WIG vehicle flight dynamics with reference to non-stationary constituents of aerodynamic characteristics [14]. Third, we have to point out that presently the paradigm of WIG vehicle flight control in ground-effect mode is in itself the subject of research and argument, also including the performance of automatic control and stability control systems [15]. As an example, there are attempts to find the proof for the concept of controlling WIG vehicle flight altitude by changing its velocity. As a rule, here every specified altitude of WIG vehicle's flight corresponds to a certain horizontal flight velocity (in the absence of active control of the angle of attack and, consequently, on condition that $c_{y_a} = \text{const}$). Nevertheless, the offered methodology, software, and the corresponding modelling results allow to evaluate the WIG vehicle static stability even at the stage of preliminary design plan, to outline the range of applicable construction and configuration factors.

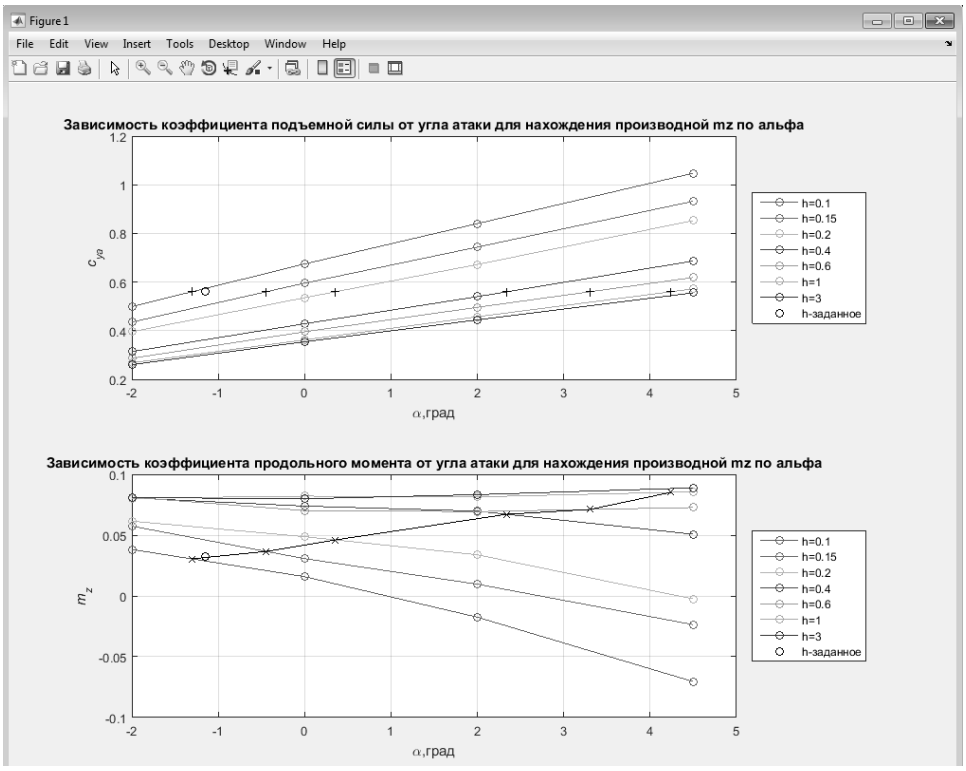


Fig. 8. The example of the derivative m_z^{α} calculation when $c_{y_a} = \text{const}$

Рис. 8. Пример расчета производной m_z^{α} для случая $c_{y_a} = \text{const}$

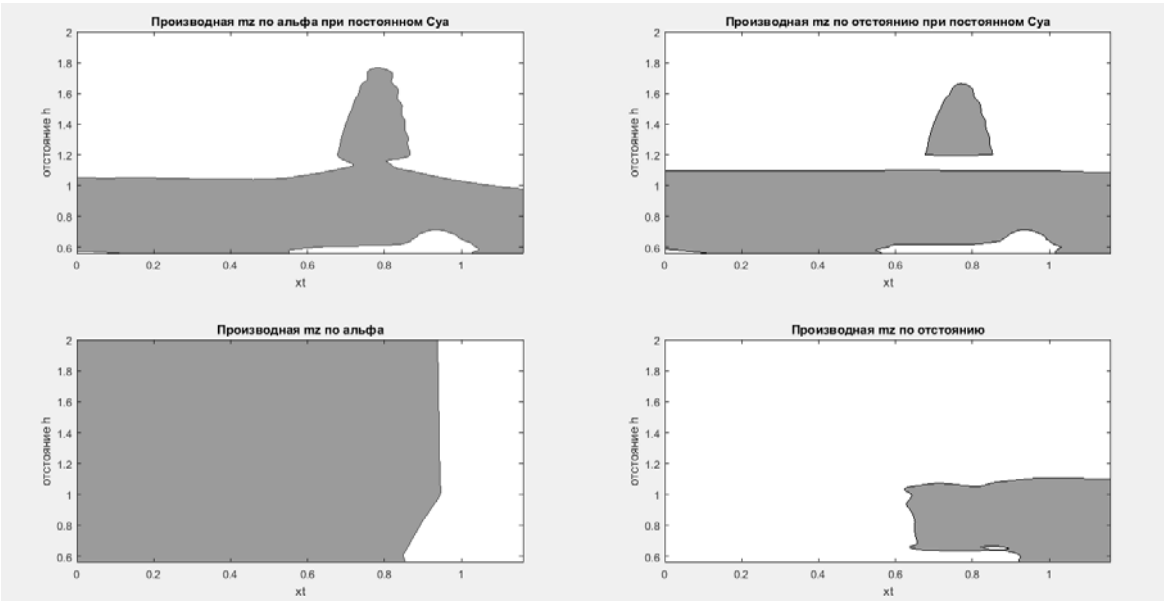


Fig. 9. Areas of longitudinal static instability (dark grey)
with respect to criteria $\left.\frac{dm_z}{d\alpha}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}} < 0$ and $\left.\frac{dm_z}{d\bar{h}}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}} < 0$ (above)
and $\frac{dm_z}{d\alpha} < 0$ and $\frac{dm_z}{d\bar{h}} < 0$ in the distance and relative center-of-mass location coordinates

Рис. 9. Области продольной статической неустойчивости (обозначены темным цветом)
по критериям $\left.\frac{dm_z}{d\alpha}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}} < 0$ и $\left.\frac{dm_z}{d\bar{h}}\right|_{c_{y_a}=c_{y_a\,\text{ГП}}} < 0$ (верхние графики)
и $\frac{dm_z}{d\alpha} < 0$ и $\frac{dm_z}{d\bar{h}} < 0$ в координатах отстояния и относительного положения центра масс

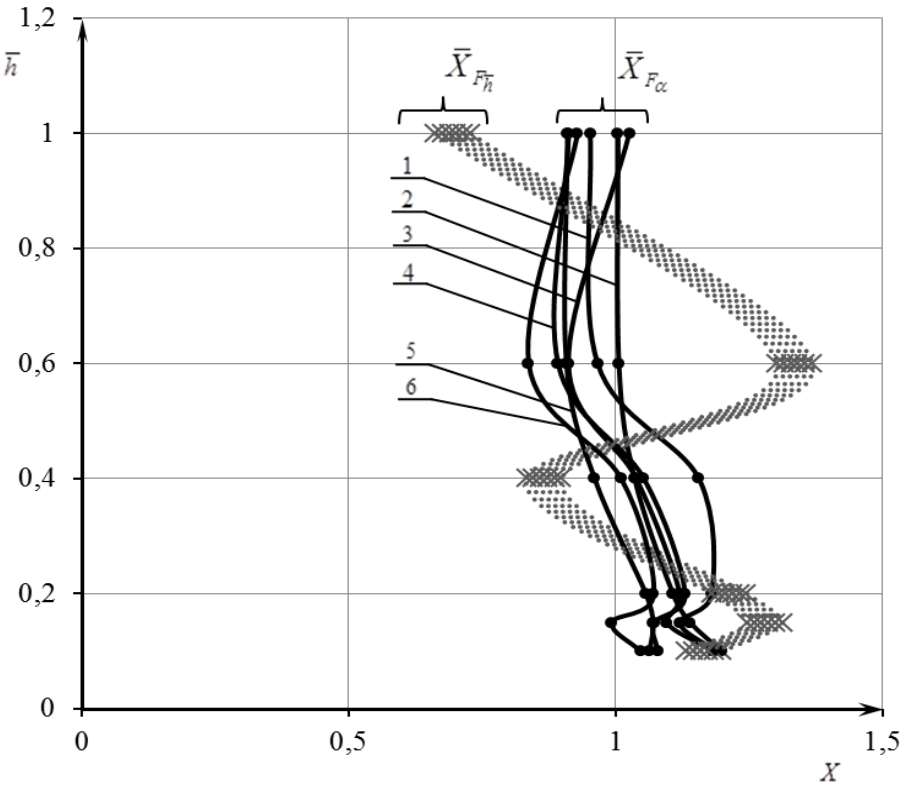


Fig. 10. Dependence of the distance foci locations $\bar{x}_{F\bar{h}}$ and of the angle of attack $\bar{x}_{F\alpha}$ on the distance $\bar{h}$ and the center of mass location $\bar{X}_T = 1.69673$:
1 – $\bar{X}_T = 0.7653$; 2 – $\bar{X}_T = 0.99803$; 3 – $\bar{X}_T = 1.2313$;
4 – $\bar{X}_T = 1.46403$; 5 – $\bar{X}_T = 1.69673$; 6 – $\bar{X}_T = 1.9293$

Рис. 10. Зависимость положений фокусов по отстоянию $\bar{x}_{F\bar{h}}$ и углу атаки $\bar{x}_{F\alpha}$ от отстояния $\bar{h}$ и положения центра масс $\bar{X}_T = 1{,}69673$:
1 – $\bar{X}_T = 0{,}7653$; 2 – $\bar{X}_T = 0{,}99803$; 3 – $\bar{X}_T = 1{,}2313$;
4 – $\bar{X}_T = 1{,}46403$; 5 – $\bar{X}_T = 1{,}69673$; 6 – $\bar{X}_T = 1{,}9293$

References

1. Byushgens G. S., Studnev R. V. *Dinamika samoleta. Prostranstvennoe dvizhenie* [Airplane dynamics. Spatial motion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 320 p.

2. GOST 20058–80. *Dinamica letatelnykh apparatov v atmosphere. Terminy, opredeleniya i oboznacheniya*. [State Standart 20058–80. Dynamics of aircraft in the atmosphere. Terms, definitions and notation]. Moscow, Standartionform Publ., 1980, 54 p.

3. Tarasenkov A., Braga V., Taranenko V. *Dinamika poleta i boevogo manevrirovaniya letatelnykh apparatov. Chast 2: Balansirovka, ustoychivost i upravlyaemost* [Dynamics of flight and combat maneuvering of aircraft. Part 2: Balancing, stability and controllability]. Moscow, The Military Air Engineering Academy. Prof. N. E. Zhukovsky, 1973, 334 p.

4. Belavin N. I. *Ekranoplany* [Ground-effect vehicles]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1977, 232 p.

5. Meshcheryakov I. N. [Influence of structural and regime parameters on the stability of the ekranoplan near the reference surface]. *Nauchny vestnik MGTU GA*. 2010, Vol. 151, P. 175–180 (In Russ.).

6. Irodov R. D. [Criteria of the longitudinal stability of the ground-effect vehicle]. *Uchenye zapiski TSAGI*. 1970, Vol. 1, No. 4, P. 63–72 (In Russ.).

7. Zhukov V. I. *Osobennosti aerodinamiki, ustoychivosti i upravlyemosti* [Features of aerodynamics, stability and controllability of the ground-effect vehicle]. Moscow, TSAGI Publ., 1997, 81 p.

8. Kornev N., Matveev K. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground effect vehicles. AIAA, 2003-600, 2003, 41*st* Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan., 2003, Reno, Nevada.

9. Wanga H., Teoa C., Khooa B., Goha C. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft. 7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 7th APCATS, 2013, Procedia Engineering 67 (2013) 15–24. Available at: http://www.elsevier.com/locate/procedia.

10. Dyagterev G. L., Bulygin A. V., Moiseev A. N. [Scientific and technical problems of transport ground-effect vehicle design for civil application]. *Vestnik KGTY imeni A. N. Tupolev.* 2000, No. 3, P. 3–9 (In Russ.).

11. Vshivkov Y., Galushko E., Krivel S. [Comprehensive reliability assessment of aerodynamic characteristics computed with ANSYS for compound objects]. *Crede-Experto: Transport, society, education, language*. 2015, No. 1 (03) (In Russ.). Available at: http://ce/if-mstuca.ru (accessed 15.02.2016).

12. Bratus S. Y., Vshivkov Y. F., Galushko E. A. [Aerodynamic features and characteristics of WIG vehicle configurations of “duck” and “tandem” schemes]. *Vestnik IrGTU*. 2016, No. 5(112), P. 168–180 (In Russ.).

13. Blokhin V. N., Prokhorov V. M., Kalyasov P. S. [Application of computational experimental methods for determining the aerodynamic characteristics of WIG vehicle in cruising mode of flight]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo.* 2012, No. 3(1), P. 147–154 (In Russ.).

14. Gryain V. E., Strelkov V. V. [Stability, controllability and principles of automation of control of WIG vehicle in cruising flight mode]. *Uchenye zapiski TSAGI.* 2004, Vol. XXXV, No. 3–4, P. 79–89 (In Russ.).

15. Nebylov A. V. [The problems, theory and systems of automatic control of WIG vehicles] *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya* [All-Russian Conference on Control Problems] Moscow, 2014. Available at: http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/prcdngs/3391.pdf, свободный (25.04.2017) (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В. Динамика самолета. Пространственное движение. М. : Машиностроение, 1983. 320 с. : ил.

2. ГОСТ 20058–80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения.

3. Тарасенков А., Брага В., Тараненко В. Динамика полета и боевого маневрирования летательных аппаратов. Ч. 2. Балансировка, устойчивость и управляемость : учебник для слушателей инженерных вузов ВВС / под ред. А. М. Тарасенкова. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1973. 334 с.

4. Белавин Н. И. Экранопланы. Л. : Судостроение, 1977. 232 с.

5. Мещеряков И. Н. Влияние конструктивных и режимных параметров на устойчивость экраноплана вблизи опорной поверхности // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 151. С. 175–180.

6. Иродов Р. Д. Критерии продольной устойчивости экраноплана // Ученые записки ЦАГИ. 1970. Т. 1, № 4.

7. Жуков В. И. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экраноплана. М. : Издательский отдел ЦАГИ, 1997. 81 с. : ил.

8. Kornev N., Matveev K. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles // AIAA, 2003-600: 41*st* Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. Reno, Nevada, 2003.

9. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft / H. Wanga [et al.] [Электронный ресурс] // 7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science. 7th APCATS, 2013. С. 15–24. URL: http://www.elsevier.com/locate/procedia.

10. Научно-технические проблемы создания транспортных экранопланов гражданского применения / Г. Л. Дегтярев [и др.] // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2000. № 3. С. 3–9.

11. Вшивков Ю., Галушко Е., Кривель С. Комплексная оценка достоверности расчета аэродинамических характеристик сложных объектов с использованием ANSYS [Электронный ресурс] // CredeExperto: транспорт, общество, образование, язык. 2015. № 1 (03). URL: http://ce/if-mstuca.ru (дата обращения: 15.02.2016).

12. Аэродинамические особенности и характеристики компоновок экраноплана схем «утка» и «тандем» / С. Ю. Братусь [и др.] // Вестник ИрГТУ. 2016. № 5 (112). С. 168–180.

13. Применение методов вычислительного эксперимента для определения аэродинамических характеристик экраноплана на крейсерском режиме движения / В. Н. Блохин [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 3(1). С. 147–154.

14. Грязин В. Е., Стрелков В. В. Устойчивость, управляемость и принципы автоматизации управления экранопланом на крейсерском режиме полета // Ученые записки ЦАГИ. 2004. Т. XXXV, № 3–4. С. 79–89.

15. Небылов А. В. Проблемы, теория и системы автоматического управления экранопланов [Электронный ресурс] // XII Всерос. совещание по проблемам управления. М. : ИПУ РАН, 2014. URL: http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/prcdngs/3391.pdf, свободный (дата обращения: 25.04.2017).

© Vshivkov J. F., Krivel S. M., 2017

UDC 629.785:523.45

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 851–857

THE ANALYSIS OF COMPLETED, ONGOING AND POTENTIAL MISSIONS TO THE JUPITER SYSTEM

E. S. Gordienko, I. V. Platov*, A. V. Simonov

Lavochkin Association
24, Leningradskaya Str., Khimki, Moscow region, 141400, Russian Federation
*E-mail: aia@laspace.ru

In the next decade, a significant increase in the intensity of the Jupiter system and its satellites studying with the help of spacecraft is expected. The two Galilean moons – Europe and Ganymede – are particularly interesting since the potential life is possible on these objects, even in a primitive form. Such missions are being developed by ESA ("Jupiter Icy Moon Explorer" (JUICE)), NASA ("Europa Clipper" and "Europa Lander"), Roskosmos ("Laplace-P") and others.

The final goal of the European and Russian projects is the detailed study of Ganymede – the largest satellite both in the Jupiter system and in the entire Solar system. The Russian perspective project "Laplace-P" assumes the creation and launch of two spacecrafts in one launch window. At the heart of the first mission spacecraft is an orbiter. One of its tasks is mapping the surface of Ganymede from the orbit of an artificial satellite and collecting data for selecting a landing site of the second spacecraft – a landing satellite. The project should be based on the launch of a spacecraft from the Baikonur cosmodrome with the help of the Angara-A5 launcher and the KVTK upper stage. When developing the flight scheme it is assumed that in 8 years the spacecrafts should be put into the orbit around Ganymede. The flight trajectory to Jupiter is formed with the help of gravitational maneuvers near the Earth and Venus. The mission of "JUICE" involves the study of Ganymede only from the orbit of an artificial satellite.

The article is devoted to comparison of completed, carried out and perspective expeditions to the Jupiter system. If the first mission – "Galileo" – was mainly focused on Jupiter itself, the future missions are aimed at investigations of its satellites. Based on the analysis of the reviewed projects, recommendations are given to improve the efficiency of the Russian "Laplace-P" project.

It is established that to improve the efficiency of the Russian mission "Laplace-P" it is recommended both further structural improvement of space vehicles and the development of a trajectory in the Jupiter system based on modern methods of ballistic design.

Keywords: spacecraft, Jupiter investigation, Europa, Ganymede, orbiter, lander, flight profile.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 851–857

АНАЛИЗ МИССИЙ В СИСТЕМУ ЮПИТЕРА: СОСТОЯВШИЕСЯ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ

Е. С. Гордиенко, И. В. Платов*, А. В. Симонов

АО «НПО им. С. А. Лавочкина»
Российская Федерация, 141400, г. Химки, Московской области, ул. Ленинградская, 24
*E-mail: aia@laspace.ru

В ближайшее десятилетие ожидается значительное увеличение интенсивности изучения системы Юпитера и его спутников с помощью космических аппаратов. Особенно интересны две галилеевы луны – Европа и Ганимед. На этих объектах потенциально возможна жизнь, пусть даже и в примитивной форме. Такие миссии разрабатываются ЕКА (Jupiter Icy Moon Explorer, JUICE), НАСА (Europa Clipper и Europa Lander), Роскосмосом («Лаплас-П») и др.

Финальной целью европейского и российского проектов является детальное изучение самого большого спутника как в системе Юпитера, так и во всей Солнечной системе – Ганимеда. Российский перспективный проект «Лаплас-П» предполагает создание и запуск в одно стартовое окно двух космических аппаратов. В основе первого КА миссии лежит орбитальный аппарат. Одной из его задач является картографирование поверхности Ганимеда с орбиты искусственного спутника и сбор данных для выбора места посадки второго КА – посадочного. Проект должен быть разработан исходя из запуска космического аппарата с космодрома Байконур при помощи ракеты-носителя «Ангара-А5» и разгонного блока КВТК. При разработке схемы полёта предполагается, что через 8 лет аппараты должны выйти на орбиту вокруг Ганимеда. Траектория перелёта к Юпитеру формируется с помощью гравитационных маневров у Земли и Венеры. Миссия JUICE предполагает изучение Ганимеда только с орбиты искусственного спутника.

Представлено сравнение состоявшихся, осуществляемых и перспективных экспедиций в систему Юпитера. Если первая миссия «Галилео» в основном исследовала сам Юпитер, то разрабатываемые миссии нацелены на исследование его спутников. На основании анализа рассмотренных проектов приводятся рекомендации по повышению эффективности российского проекта «Лаплас-П».

Установлено, что для повышения эффективности российской миссии «Лаплас-П» рекомендуется как дальнейшее конструкционное совершенствование космических аппаратов, так и разработка траектории в системе Юпитера на основе современных методов баллистического проектирования.

Ключевые слова: космический аппарат, исследования Юпитера, Европа, Ганимед, орбитальный аппарат, посадочный аппарат, схема полёта.

Introduction. One of the most attractive goals of the Jupiter system research is life detection on its satellites – Europa and Ganymede. Mars and Titan (a Saturn satellite) are always considered to be potentially habitable objects in Solar System as well.

In the next decade the intensive studying of the Jupiter system and its satellites with the help of spacecrafts is expected. Such missions are being developed by ESA (“Jupiter Icy Moon Explorer” (JUICE)), NASA (“Europa Clipper” and “Europa Lander”) and Roskosmos (“Laplace-P”). The final goal of the European and Russian projects is the detailed study of the largest satellite both in the Jupiter system and in the entire Solar system – the Ganymede. The project “Laplace-P” includes two spacecrafts: an orbiter “Laplace-P1” and a lander “Laplace-P2”. The “JUICE” mission is assumed to study Ganymede only from the orbit of an artificial satellite. The expedition “Europa Clipper” carries out the investigation of Europa from the jovicentric orbit by spacecraft-satellite rendezvous procedure. “Europa Lander” is an independent spacecraft and it is expected to be launched in the next launch window shortly after “Europa Clipper”.

It should be noticed that about 10 years ago it was planned to realize a joint project “Europa Jupiter System mission – Laplace (EJSM/Laplace)” instead of those mentioned above. It included NASA and ESA with their own spacecrafts: “Jupiter Europa Orbiter” (USA) and “Jupiter Ganymede Orbiter” (Europe). Later on Japan’s National Aerospace Agency (JAXA) with the spacecraft “Jupiter Magnetospheric Orbiter” and Roskosmos with the “Jupiter Europa Lander” joined the project [1].

In 2011 NASA withdrew from the joint project because of the reduction of budget. ESA decided to work out a spacecraft for the Jupiter system investigation and in 2012 announced the independent mission JUICE with the launch in 2022 [2]. The American project was substantially reduced due to cutbacks of funding. At first it was named “Europa Multiply-Flyby Mission” [3] and assumed only several Europa proximity missions. However, it was even considered to realize the ascent to its orbit but this idea was abandoned later. The project was renamed as “Europa Clipper”. This spacecraft is to be launched in 2021 [4]. In 2016 it was decided to improve the mission with an additional independent spacecraft with the “Europa Lander” module [5]. It is planned to be launched in 2025.

JAXA is not actively engaged in the Jupiter system studying mission so far.

The Russian part of the mission has been revised as well. It supposed to create a lander originally designed for the surface data transmission by means of “JEO” spacecraft used as a retransmission station. An orbiter has been included in the project whose priorities are selecting a landing site for the lander and data transmission. Both spacecrafts are to be launched in one launch window in 2026 [6–8]. Because of high radiation intensity at a distance from Jupiter equal to the Europa orbital radius Ganymede has become the final goal of the Russian project “Laplace-P” because the level of radiation on this satellite is noteworthily lower.

The three above mentioned projects are based on the experience of the Jupiter first artificial satellite – the “Galileo” spacecraft. Its task was to analyze the chemical compound and physical characteristics as well as to perform close-look photography of Jupiter satellites. The spacecraft consisted of a long term monitoring orbiter and a special atmospheric research probe. The spacecraft was launched on 18 October, 1989; in 1995 it entered the Jupiter orbit and was in operation till 2003. It provided more than 30 GB amount of data including 14 000 planetary and satellites’ images as well as unique information about the planetary atmosphere. The spacecraft was named after Galileo Galilei who made a discovery of four Jupiter satellites in 1610. Nowadays the spacecraft “Juno” which was launched on the 5th of August 2011 investigates this giant planet and its magnetosphere. It entered the orbit of the Jupiter artificial satellite on the 5th of July 2016. “Juno” is expected to be in operation till February 2018. The mission is entirely focused on the study of the giant planet, not on its satellites. To supply power three higher-rated solar batteries with radiation damage stability were installed on “Juno” as distinct from the previous research spacecrafts equipped with radioactive thermoelectric generators. In this paper the characterization of Jupiter and its moons research efficiency is presented and the mission effectiveness according to the analyzed criteria is evaluated.

Mission profiles. The Jupiter and its planetary system were studied by means of only spacecrafts with Jupiter gravity-assist trajectory up to 1995. They were “Pioneer-10” (1973), “Pioneer-11” (1974), “Voyager-1” and “Voyager-2” (1979), “Ulysses” (1992 and 2000). “Cassini” (2000) and “New Horizons” (2007) also passed by this planet. Heliocentric flight phase of all these spacecrafts except “Cassini” was a direct flight to Jupiter and did not include gravity-assist (GA) maneuvers.

In 1995 “Galileo” became the first Jupiter artificial satellite. It had been launched in 1989, six years before [9]. Its interplanetary trajectory included three gravity assists: once near the Venus and twice near the Earth (VEEGA). In eight years of studying the Jupiter system the spacecraft accomplished 35 orbits having passed close all its

large satellites. The jovicentric phase of the flight trajectory was mainly in equator plane [10].

In 2016 the spacecraft "Juno" entered the Jupiter orbit. This spacecraft covered the distance to the giant planet by a faster profile than "Galileo". The flight lasted one year less and included only one Earth gravity assist (EGA). However, the implementation of such a flight scheme is a higher-energy mission than the Venus-Earth-Earth one. The Jupiter orbit of the spacecraft is to be rotated at a larger angle to the equator – up to 35°. It was initially planned that the spacecraft would enter the elliptical polar orbit with the period about 53 earth days and with the pericenter altitude less than 5000 km. Later on the orbital period was to be lowered till 14 earth days [11]. Because of power plant problems it was decided to keep the spacecraft on the 53 days orbit. It wasn't anticipated that the spacecraft would execute any gravity-assist maneuvers to change the orbit period

The basic characteristics of heliocentric flight phase of the mission to the Jupiter system are shown in tab. 1.

The perspective JUICE, "Europa Clipper / Lander" and "Laplace-P" missions are to enter the orbits of the Galilean moons (Europa and Ganymede) orbital vehicles in the final phase of the mission. Interplanetary flight phases include a number of gravity-assist maneuvers near the Venus and Earth: according to the VEEGA scheme applied for "Galileo" and for the Russian expedition as well and to the EVEEGA one applied for the European missions. Heliocentric trajectory of the "Europa Lander" spacecraft performs only one gravity assist maneuver near the Earth ("EGA" scheme) like the "Juno" spacecraft does. To date "Europa Clipper" will fly to the Jupiter performing no maneuvers in case of the perspective superheavy "SLS" booster launch and according to the VEEGA scheme in case of the "Atlas V 551" booster launch.

Before the launching phase of the "JUICE" and "Europa Clipper / Lander" spacecrafts to enter the Jupiter initial orbit the gravity assist maneuver is performed near Ganymede. This allows saving about 400 m/s of characteristic speed [12]. Nevertheless, such GA maneuver is out of the profile of Russian "Laplace-P" missions because of its complex implementation. It is required to synchronize the spacecraft trajectory with Ganymede very precisely.

After entering the Jupiter initial orbit the flight profile of all the three missions follow the similar patterns. The main task of the Jupiter mission early stage is the orbit energy attenuation (being determined by its period) by GA maneuvers sequence near the largest Jupiter satellite – the Ganymede. At the second stage "Callisto" or "Europa" also performs GA maneuvers to reduce asymptotic speed by approaching to the satellite which is the final goal of the mission [13; 14]. The comparison of trajectory schemes is shown in tab. 2. The cumulated dose is estimated for an aluminum shield 1 cm in thickness.

In terms of the complex approach (an acceptable dose of radiation by the characteristic speed lower input) the implementation of the scheme with the GA maneuvers near the Ganymede, the Callisto and the Europa is the most favourable option.

The JUICE spacecraft trajectory has two additional phases as compared to the "Europa Lander" and "Laplace-P" missions. The first phase is studying the Europa by flying around two times (the process time is approximately 36 earth days). The second one is a high-latitude phase of studying the Jupiter with the orbital plane change at about 22° to the equator which is available from GA maneuvers near the Callisto. The process time is approximately seven months.

"Europa Clipper" jovicentric phase is a little different from the "orbital" missions. After the first required phase of energy orbit reduction in a period of 11 months the main phase of the mission starts which goal is to study the Europa by 35 approaches in a period of one year and a half.

Quality characteristics of Jupiter missions. The main characteristics of spacecrafts and their flight profiles for the completed and perspective Jupiter system missions are shown on tab. 3. Energy-mass characteristics and spacecraft profiles primarily define flight time and proper technology mass.

Table 1

Comparative characteristics of heliocentric flight phase options concerning to the Jupiter mission

Parameter	Path			
	Straight	EGA	VEEGA	VVEGA
Characteristic deorbiting acceleration speed of an earth artificial satellite, km/s	6.8	4.4	3.8	3.8
Asymptotic departure speed, km/s	9.5	5.2	3.5	3.5
Mandatory maneuvers, km/s	–	0.6	–	–
Asymptotic arrival speed, km/s	6	6	6	6
Flight duration, year	2–3	4–5	6–8	6–8
Return period, year	1	1	2–4	2–4

Table 2

Comparative characteristics of the Jupiter mission paths

Scheme	Flight duration, year	Characteristic speed input, km/s	Cumulated dose, Mrad
Straight entering the satellite orbit	0	more than 5.5	0
GA maneuver near Callisto	0.5	3	0
GA maneuver near Ganymede and Callisto	1	2.5	0.1–0.5
GA maneuver near Ganymede, Callisto and Europa	1.5	1.5	0.8–1.2
GA maneuver near Ganymede, Callisto, Europa and Io	2.5	1.3	1.7

Table 3

The main spacecraft characteristics for studying the Jupiter system

Parameter / mission	"Galileo"	"Juno"	"Europa Clipper"	"Europa Lander"	JUICE	"Laplace-P1"	"Laplace-P2"
Original mass of a spacecraft, kg	2333	3625	3200	7100	2300	7000	6800
Launch year	1989	2011	2021	2025	2022	2026	
Flight profile	VEEGA	EGA	VEEGA	EGA	EVEEGA	VEEGA	
Flight duration, year	6	5	6.4	4.7	7.6	6.1	6.1
Launcher, upper stage	«Atlantis», «IUS»	«Atlas V 551»	«Atlas V 551»	«SLS», «Block 1»	«Ariane-5», «ESA»	«Angara-A5», the KVTK	
Entering Ganymede (G) / Europa (E) satellite orbit (1) or landing (2)	no	no	no	2	1	1	2
Number of GA maneuvers in the Jupiter system before entering the (G) / (E) satellite orbit	– (24)	– (0)	– (42)	16	15+2+10	10	13
Duration of jovicentric phase before entering the (G) / (E) satellite orbit	– (2844)	– (596)	– (874)	641	767+208	758	804
Studying time, year	8	2	3.5	2+20 days (the lander)	3.5	3	2+1 days (the lander)
Power source	2 RITEG	3 SP	4 RITEG	2 SP	2 SP	4 SP	2 RITEG
Technology mass, kg	118	173.7	127	42.5	104	50	50
Spacecraft thrust loading, N							
Orbital maneuvering engines	400	645	890		424	4×390	1×8428 2×590
Vernier thrusters qty×drive	12×10	12×–	4×90 16×4		8×22	12×13 4×55	12×6 4×50

Remarks:

1. EGA is a scheme with one GA maneuver near the Earth.
2. VEEGA is a scheme with three GA maneuvers near the Venus (one time) and the Earth (two times).
3. EVEEGA – is a scheme with four GA maneuvers near the Earth – the Venus – the Earth – the Earth.
4. SP is a solar panel.
5. (–) means that the characteristic is unavailable.

In accordance with the mission history and above mentioned scientific tasks the main quality characteristics for the comparative analysis of Jupiter system studying efficiency were estimated:

– duration of heliocentric phase $T_{С}$;

– duration of jovicentric phase $T_{Ю}$;

– a number of GA maneuvers in the Jupiter system before entering the (G) / (E) satellite orbit $N_{ГМ}$;

– studying time $T_{И}$;

– technology mass $m_{ПН}$;

– remote (from the orbiter) and contact (from the lander) studying $J_{П}$.

Hence, it is required to solve a task of complex technical system optimization upon the vector criterion to compare mission effectiveness and to make the valid decision [15]. It can be solved by systems analysis methods.

In this paper a method of convolution from the vector to the scalar criterion is used. Thereat, the optimized functional is a linear combination of control criteria which value is defined by the weight coefficients of linear convolution assignment.

For reference and spacecraft design selection the following composed function is used:

$$F = k_{tС}T_{С} + k_{tЮ}T_{Ю} + k_{N}N_{ГМ} + k_{m}m_{ПН} + k_{И}T_{И} + k_{П}J_{П}, \quad (1)$$

where $k_{tС}$, $k_{tЮ}$, k_{N}, k_{m}, $k_{И}$, $k_{П}$ are weight coefficients which formulate the priority of each quality characteristic.

Taking into consideration that the values of quality characteristics included in the composed function (1) must be regulated they are to be estimated in the following way:

– for duration of heliocentric and jovicentric phases of the flight and for the number of GA maneuvers (which larger values decrease the mission reliability) as dependency of a current mission value to the maximum value of all missions;

– for the payload mass and duration time of scientific investigation (whose larger values increase the mission effectiveness) as dependency of a current mission value to the maximum value of all missions;

– the value of "orbiting/landing" functional $J_{П}$ is equal to 1,0 when landing on a Jupiter satellite ("Europa Lander" and "Laplace-P2)"; 0,5 when studying from the orbit (JUICE и "Laplace-P1"); 0,2 from the GA trajectory ("Europa Clipper" and "Galileo"); 0,1 without any GA maneuvers ("Juno").

Table 4

The values of the Jupiter mission effectiveness criteria

Mission	$F_С$	$F_Ю$	$F_ГМ$	$F_ПН$	$F_И$	$F_П$	F
“Galileo”	0.040	0.023	0.021	0.200	0.170	0.070	0.522
“Juno”	0.048	0.108	0.050	0.042	0.250	0.035	0.532
JUICE	0.031	0.088	0.033	0.088	0.149	0.175	0.565
“Europa Clipper”	0.037	0.073	0.012	0.061	0.122	0.070	0.376
“Europa Lander”	0.050	0.100	0.031	0.046	0.118	0.350	0.696
“Laplace-P1”	0.039	0.085	0.050	0.079	0.079	0.175	0.506
“Laplace-P2”	0.039	0.080	0.038	0.082	0.079	0.350	0.668

The values of weight characteristics expressing the particular quality parameters mustn’t be defined exactly and are subjective. As a rule these values are chosen in accordance with the expert evaluation method in such a way to reflect the priority of each quality characteristic [16]. In this case one of the most important scientific effectiveness criteria may be the technology mass and the inclusion of landing on the Jupiter satellite into the mission scheme. The flight duration and the number of GA maneuvers influence mainly the mission reliability not its scientific value. That is why these coefficient values must be lower. According to the outlined logic the following weight coefficient values may be taken: $k_{tС} = 0.05$, $k_{tЮ} = 0.10$, $k_N = 0.05$, $k_m = 0.25$, $k_И = 0.20$, $k_П = 0.35$.

In accordance with the values of the partial criteria of mission effectiveness mentioned above the functional value for the outlined missions for the Jupiter system studying (1) were estimated. The results are shown in tab. 4. The final value of effectiveness is in the last column. When calculating the criteria $F_Ю$ and $F_ГМ$ for the JUICE project the phases of high-latitude studying the Jupiter and the Europa investigations by two-time orbiting are neglected as these phases increase the scientific effectiveness of the mission and are not to low the functional final value.

It must be mentioned that the “Laplace-P” mission is complex because it consists of two coordinated spacecrafts operating simultaneously. That’s why the arithmetic mean value for two spacecrafts may be taken as the final functional value (1) for the “Laplace-P” project. It is equal to 0.587. Data analysis from tab. 3 shows that the “Europa-Lander” mission demonstrates the maximum effectiveness in accordance with the specifications stated. This mission seems to be more attractive due to the landing availability by high technology mass. The relatively short period from the ground take-off to the reaching the Jupiter satellite orbit is also essential. This is achieved by using the super-heavy launcher “SLS”.

Recommendations for “Laplace-P” mission further elaboration. To improve the “Laplace-P” mission effectiveness the mass of targeted spacecraft payload and power system capacity may be updated without increasing the total mass of the spacecraft. Thereto several options are considered, for example a configuration with the substitution of four SP (with the complex multiple opening and closing system) for 2 RITEG units. The possibility of life-extension for the lander should be taken into consideration. It is assumed to improve the spacecraft structure in terms of the mass and the desired degree of the dose buildup protection. The lander structure [6] may be improved in terms of the frame and the fuel tank unit integration. Such decision is dictated by the need to displace the spacecraft mass center closer to the surface formed by landing pads. Based on the results of the preliminary engineering the load-carrying construction for the lander propulsion system is a welded frame which has a form of a frustum with four peaks on the top and eight those on the bottom. Landing pads, fuel tanks, spherical tanks, compensator tanks, bars and carriers for engine assembly and structural components (8) are set up on the frame. The usage of a lower thrust (mass) propulsion engine is optionally recommended.

The more effective trajectories of two spacecrafts should be elaborated which may provide less duration time of the flight to the Jupiter system, less total dose of radiation and waste of fuel. Decisions may be found with the help of the high-altitude GA maneuvers in a restricted three-body problem [17] and it requires a high level of qualification in the field of dynamical astronomy and a creative approach from decision makers.

In spite of the high complexity the above mentioned problems can be solved at the following stages by the detailed in-depth analysis by reference of the experimental data described in this paper.

Conclusion.

1. This article presents completed, ongoing and perspective missions to the Jupiter system carried out by Russian and world specialists. The flight schemes in Earth-Jupiter and Jupiter system phases are described. The analysis of spacecraft main characteristics is made.

2. Mission quality criteria for remote and contact the Jupiter system studying are defined and the functional of effectiveness is estimated. According to the achieved results the perspective “Europa Lander” (NASA) expedition is considered to be the most effective one. It is based on the facts that the spacecraft is to be placed into orbit with the help of the super-heavy “SLS” booster and that it has a more advanced flight scheme which allows carrying a great amount of technology mass on the Europa.

3. To improve the effectiveness of the Russian perspective “Laplace-P” mission it is suggested both further structure development of spacecrafts and improvement of the Jupiter mission schemes in terms of up-to-date ballistic engineering methods.

References

1. Zelenyi L., Korablev O., Martynov M., Popov G., Blanc M., Lebreton J. P., Pappalardo R., Clark K., Fedorova A., Akim E., Simonov A., Lomakin I., Sukhanov A., Eismont N. and the Europa Lander Team. Europa Lander mission and the context of international cooperation. *Advances in Space Research*. 2011, Vol. 48, Iss. 4, P. 615–628.

2. Boutonnet A., Schoenmaekers J. JUICE: Consolidated Report on Mission Analysis (CReMA). *ESA*. 2012, Reference WP-578. Iss. 1, 86 p.

3. *Europa Multiple-Flyby Mission*. NASA/Jet Propulsion Laboratory. Available at: http://www.jpl.nasa.gov/missions/europa-mission/ (accessed: 15.12.2017).

4. Europa Study 2012 Report. Executive summary. NASA/Jet Propulsion Laboratory. Available at: http://www.jpl.nasa.gov/missions/europa-mission/ (accessed: 01.07.2017).

5. Hand K. P., Murray A. E., Garvin J. B., Brinckerhoff W. B. et al. Report of the Europa Lander Science Definition team, 2017. NASA/Jet Propulsion Laboratory. Available at: http://www.jpl.nasa.gov/missions/europa-mission/ (accessed: 01.07.2017).

6. Platov I. V., Simonov A. V. [Development of the propulsion construction and the trajectory for the spacecrafts of the "Laplace-L" mission for the study of Jupiter planetary system]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 3, P. 710–721 (In Russ.).

7. Martynov M. B., Merkulov P. V., Lomakin I. V., Vyatlev P. A. et al. [Russian perspective mission "Laplace-P" for studies of Jupiter planetary system: scientific goals and objectives, mission special features. Mission profile]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*. 2016, No. 2, P. 3–10 (In Russ.).

8. Martynov M. B., Merkulov P. V., Lomakin I. V., Vyatlev P. A. et al. ["Laplace-P" an advanced Russian project aimed at Jupiter planetary system research. Development of spacecraft conceptual design]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*. 2016, No. 3, P. 77–82 (In Russ.).

9. Galileo Mission to Jupiter – NASA Facts. NASA/Jet Propulsion Laboratory. Available at: http://www.jpl.nasa.gov/news/fact_sheets/galileo0309.pdf (accessed: 01.07.2017).

10. Soloviov C. V., Tarasov E. V. *Prognozirovanie megplanetnykh poleotov* [Forecasting of interplanetary flights]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1973, 400 p.

11. Juno Mission to Jupiter – NASA Facts. NASA/Jet Propulsion Laboratory. Available at: http://www.nasa.gov/pdf/316306main_JunoFactSheet_2009sm.pdf (accessed: 01.07.2017).

12. Campagnola S., Buffington B. B., Petropoulos A. E. Jovian tour design for orbiter and lander missions to Europa. *23rd AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Kauai*, HI, 2013. AAS 13–494.

13. Golubev Yu. F., Tuchin A. G., Grushevskii A. V., Koryanov V. V. et al. [The main methods of trajectories synthesis for gravity assist space missions to the Jupiter system with landing on one of its satellites I]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*, 2015. No. 4, P. 97–103 (In Russ.).

14. Golubev Yu. F., Tuchin A. G., Grushevskii A. V., Koryanov V. V. et al. [The main methods of trajectories synthesis for gravity assist space missions to the Jupiter system with landing on one of its satellites II]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*. 2016, No. 1, P. 37–45 (In Russ.).

15. Lebedev A. A. *Vvedenie v analiz i sintez system* [Introduction into the system analysis and synthesis]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 200, 351 p.

16. Malyshev V. V., Pichhadze K. M., Usachov E. V. *Sistemnyy analiz variantov missii i sintez programmy prjamyh issledovaniy blizhayshego okolosolnechnogo prostranstva* [System analysis of mission variants and synthesis of program of nearsun space direct investigations]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 206, 352 p.

17. Ross S., Scheeres D. Multiple Gravity Assists, Capture, and Escape in the Restricted Three-Body Problem. *Siam J. Applied Dynamical Systems, Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2007, Vol. 6, No. 3, P. 576–596.

Библиографические ссылки

1. Europa Lander mission and the context of international cooperation / L. Zelenyi [et al.] ; Europa Lander Team // *Advances in Space Research*. 2011. Vol. 48, iss. 4. P. 615–628.

2. Boutonnet A., Schoenmaekers J. JUICE: Consolidated Report on Mission Analysis (CReMA) // ESA. 2012. Reference WP-578, iss. 1, 2012-05-29. 86 p.

3. Europa Multiple-Flyby Mission [Электронный ресурс] / NASA/Jet Propulsion Laboratory. URL: http://www.jpl.nasa.gov/missions/europa-mission/ (дата обращения: 15.12.2017).

4. Europa Study 2012 Report. Executive summary [Электронный ресурс] / NASA/Jet Propulsion Laboratory. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. Дата обновления: 01.05.2012. URL: http://www.jpl.nasa.gov/missions/europa-mission/ (дата обращения: 01.07.2017).

5. Report of the Europa Lander Science Definition team [Электронный ресурс] / K. P. Hand [et al.] ; NASA/Jet Propulsion Laboratory. 2017. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. Дата обновления: 01.02.2017. URL: http://www.jpl.nasa.gov/missions/europa-mission/ (дата обращения: 01.07.2017).

6. Платов И. В., Симонов А. В. Разработка конструкции двигательных установок и траекторий космических аппаратов проекта «Лаплас-П» для исследований планетной системы Юпитера // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 710–721.

7. Перспективный российский проект «Лаплас-П» для исследований планетной системы Юпитера: цели научной миссии и её особенности. Схема полёта / М. Б. Мартынов [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2016. № 2. С. 3–10.

8. Перспективный российский проект «Лаплас-П» для исследований планетной системы Юпитера. Разработка проектных обликов космических аппаратов / М. Б. Мартынов [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2016. № 3. С. 77–82.

9. Galileo Mission to Jupiter – NASA Facts [Электронный ресурс] / NASA/Jet Propulsion Laboratory. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. Дата обновления: 15.03.2009. URL: http://www.jpl.nasa.gov/news/fact_sheets/galileo0309.pdf (дата обращения: 01.07.2017).

10. Соловьев Ц. В., Тарасов Е. В. Прогнозирование межпланетных полетов. М. : Машиностроение, 1973. 400 с.

11. Juno Mission to Jupiter – NASA Facts [Электронный ресурс] / NASA/Jet Propulsion Laboratory. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. Дата обновления: 27.10.2009. URL: http://www.nasa.gov/pdf/316306main_JunoFactSheet_2009sm.pdf (дата обращения: 01.07.2017).

12. Campagnola S., Buffington B. B., Petropoulos A. E. Jovian tour design for orbiter and lander missions to Europa // 23rd AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Kauai, HI, 2013. AAS 13-494.

13. Основные методы синтеза траекторий для сценариев космических миссий с гравитационными манёврами в системе Юпитера и посадкой на один из его спутников I / Ю. Ф. Голубев [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2015. № 4. С. 97–103.

14. Основные методы синтеза траекторий для сценариев космических миссий с гравитационными манёврами в системе Юпитера и посадкой на один из его спутников II / Ю. Ф. Голубев [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2016. № 1. С. 37–45.

15. Лебедев А. А. Введение в анализ и синтез систем. М. : Изд-во МАИ, 2001. 351 с.

16. Малышев В. В., Пичхадзе К. М., Усачёв Е. В. Системный анализ вариантов миссии и синтез программы прямых исследований ближайшего околосолнечного пространства. М. : Изд-во МАИ, 2006. 352 с.

17. Ross S., Scheeres D. Multiple Gravity Assists, Capture, and Escape in the Restricted Three-Body Problem // Siam J. Applied Dynamical Systems, Society for Industrial and Applied Mathematics. 2007. Vol. 6, № 3. P. 576–596.

© Gordienko E. S., Platov I. V., Simonov A. V., 2017

UDC 629.78

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 858–867

DEPLOYMENT CONCEPT MECHANICAL SYSTEM OF A RADAR ANTENNA FOR SPACE PURPOSES

Z. A. Kazantsev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: flexagon3@rambler.ru

One of the basic requirements to deployable mechanical systems is observance of requirements on execution of the first eigenfrequency of structure. In case of transformed structure like solar array, when the structure consists of any panels series connected with joints, this requirement is supplied with high rigidity of a structure. At low rigidity (lower then require) inevitably engenders unnecessary effects on orientation and stabilization system of spacecraft on orbit.

Other major aspect of designing of space engineering is decrease in final weight of a product. The most typical line of designing of various systems of space vehicles is compromise search between decrease in weight of a product, and, as consequence, decrease rigidity and strength properties of a structure.

In the article the proposed option of a design of a deployable mechanical system. The basic load-bearing element is set of laminate composite panels, connected with joints. The main feature is additional elements (pipe or plate) combined with basic panels. The form of a sectional structure is equilateral triangle. Selection of the given type of a structure is proved by two kinds of analyses: the kinematic analysis of a deployment from a shipping rule in working, and the modal analysis for reliability acknowledgement on first eigenfrequency. The parametric analysis of geometry of a design is carried out, optimum versions are shown.

For deeper optimization of design parameters it is necessary to carry out the following engineering analyses which have been not presented within the limits of the given article: the analysis of reliability of a deployment of mechanical devices; the structural analysis; the analysis of temperature deformations and so forth.

The given design can be applied as the power basis to solar array, antennas, and cluster orbital systems.

Keywords: modal analysis, kinematical analysis, mechanical system.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 858–867

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ РАСКРЫТИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАДАРНОЙ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

З. А. Казанцев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: flexagon3@rambler.ru

Одним из основных требований к крупногабаритным раскрываемым конструкциям является соблюдение требований по обеспечению первой частоты собственных колебаний конструкции. В случае трансформируемых конструкций типа солнечных батарей или радарных антенн, когда конструкция представляет собой несколько последовательно соединенных шарнирными узлами панелей, это требование обеспечивается высокой жесткостью конструкции. При низкой первой собственной частоте колебаний (ниже требуемой) возникают нежелательные эффекты в работе системы ориентации и стабилизации космического аппарата на орбите.

Другим важнейшим аспектом проектирования космической техники является снижение конечной массы изделия. Наиболее характерной чертой проектирования различных систем космических аппаратов является поиск компромисса между снижением массы изделия и, как следствие, снижением жесткостных и прочностных характеристик конструкции.

Предложен вариант конструкции трансформируемого механического устройства. Основным элементом данной конструкции является набор трехслойных композиционных панелей, соединенных шарнирами. Ключевой особенностью являются введенные дополнительные элементы (трубы или пластины), которые в сочетании с несущими панелями в рабочем положении образуют в сечении конструкции равносторонний треугольник. Выбор данного типа конструкции обоснован двумя видами анализов: кинематическим анализом раскрытия из транспортировочного положения в рабочее положение и модальным анализом для подтверждения требования по первой собственной частоте колебаний в рабочем положении. Проведен параметрический анализ геометрии конструкции, показаны оптимальные варианты. По результатам анализов были выбраны такие проектные характеристики конструкции, которые удовлетворяют всем критериям проведенных анализов.

Для более глубокой оптимизации проектных параметров необходимо провести следующие инженерные анализы, не представленные в рамках данной статьи: анализ надёжности раскрытия механических устройств; механический анализ; анализ температурных деформаций и пр.

Данная конструкция может быть применена в качестве силовой основы для фотопреобразователей солнечных батарей, антенных решеток радарных антенн, зеркал кластерных орбитальных систем. Возможно развертывание солнечного паруса большой площади с использованием данной схемы раскрытия конструкции.

Ключевые слова: модальный анализ, кинематический анализ, механическое устройство.

Introduction. One of the basic requirements to a large deployable mechanical system is compliance with the requirements for the first eigenfrequency of structure. In the case of transformed solar batteries or radar antennas, where the design is a series of consecutively connected panels, this requirement is ensured by a high stiffness of the structure. With a low first eingenfrequency (below required), undesirable effects occur in the orbit orientation and stabilization system of a spacecraft [1; 2].

Another critical aspect of space technology design is the reduction of final weight of the product. The most typical feature of various spacecraft systems design is the search for a compromise between the reduction of product weight and, as a result, the reduction of rigidity and strength characteristics of the structure [3].

Description of the structure. The object of the study is the construction of a mechanical space-based system. Fig. 1 shows the system in the start configuration. Fig. 2 shows a piece of the system in the deployment configuration position. The overall size of the system under which the structure is designed is presented in fig. 3.

The design concept is based on the use of honeycomb sandwich panel set [4], connected by hinges. A key feature is the use of additional elements – thin plates (thickness up to 0.1 mm) or tubes [5; 6]. The option of shared use of both types of elements is also considered. Additional elements are pinned to sandwich panels in such a way as to form the equilateral triangle in the section in the deployment configuration (fig. 4).

Description of deployment logic. Only one deployment scheme has been proposed under this article. This example shows how to address the challenges of dynamics and kinematics.

In hinges, connecting neigbouring panels, there are torsion springs that create the torque. Also in hinges there are the delay nodes that do not allow the hinges to deploy until the hinges of the previous panel deploys by 175°. Side features also deploy using delay nodes. The sidebar opens when the main panel on which it is placed comes into deployed configuration. The stages of deployment are shown in fig. 5. Start configuration complies with fig. 5, *a*. Under torsion springs, the panel set begins to rotate around the axis shown in fig. 5, *b*, all the panels of the package are retained by the delay nodes. After the set has been positioned according to fig. 5, *c*, the root hinge is fixed, the delay node of the second panel opens, and the set begins to rotate around the hinge of the second panel. After passing the deployment angle of 95 degrees, the sidebar delay node is opened, according to fig. 5, *d*. The sidebar deployed by 60° is fixed in the deployed configuration on the spacecraft. When the set arrives at the position shown in fig. 5, *e*, the sidebar delay nodes and the next hinge are deployed, and the set repeats the deployment steps. Whereas each subsequent sidebar is fixed with the previous side panel on arriving at deployed configuration. Fig. 6 shows a set of eight deployed panels.

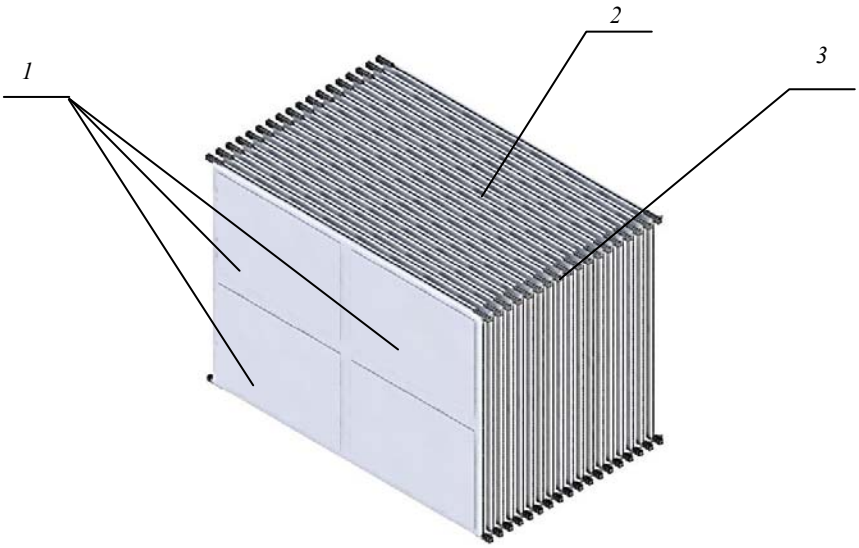


Fig. 1. Object of research – mechanical system in start configuration:
1 – payload on sandwich panel; *2* – honeycomb sandwich panel set; *3* – hinges

Рис. 1. Объект исследования – механическое устройство в транспортировочном положении:
1 – полезная нагрузка, расположенная на сотовой панели; *2* – набор трехслойных сотовых панелей; *3* – шарнирные узлы

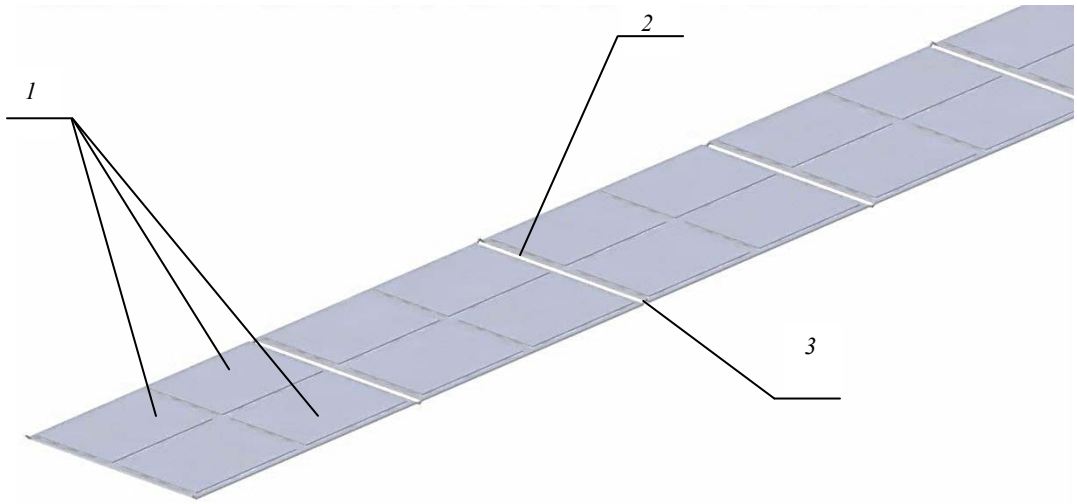


Fig. 2. Object of research – mechanical system in deployed configuration (fragment):
1 – payload on sandwich panel; *2* – honeycomb sandwich panel set; *3* – hinges

Рис. 2. Объект исследования – механическое устройство в рабочем положении (фрагмент):
1 – полезная нагрузка, расположенная на сотовой панели; *2* – набор трехслойных сотовых панелей; *3* – шарнирные узлы

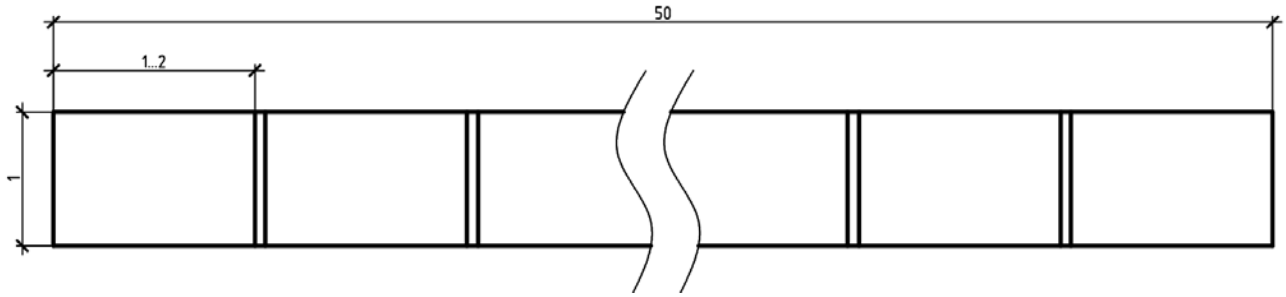


Fig. 3. Geometric dimensions of the structure, m

Рис. 3. Геометрические размеры конструкции, м

In order to reduce the number of mechanisms in the system, it is suggested that the fixation of adjacent side panels should be repositioned by locating neodymium magnets in the fields of fixation.

This type of magnet obtains magnetic energy from 200 to 420 kj/m^3. This means that the axial force that must be exerted to break the two chained magnetic cubes with the face of 10mm varies in the range of 38–60 N. Magnetic locks of small linear dimensions may thus hold the side panels with tightening force of several, up to a few dozen kilograms of power.

The factors of outer space do not affect the characteristics of neodymium magnets, and the loss of magnetic properties equals 1–2 per cent in 10 years.

For the design of a magnetic lock based on neodymium magnets, the data obtained from the calculation of the system's deployment performance must be used.

Deployment performance analysis. The calculation of deployment performance is done to determine the loads that are active in the structure elements during the deployment process. Based on the calculation model of the mechanical design system, it is necessary to identify the characteristic patterns of the movement of deploying elements with the simulation of active forces, hinges, and other elements of the kinematic scheme [7; 8].

The source data for calculations of the structure panels deployment is the mass characteristics of its elements, as well as information on the characteristics of active forces in the hinge model [9].

Since the moment of inertia of the revolving set decreases during the deployment process, it is useful to use less energy-related springs in each further hinge [10]. Springs' driving moment diagram in the first and last hinge are presented in fig. 7.

Fig. 8 shows dynamic model of panel constructions in fold position, using all necessary geometrical, kinematical and force objects.

Panel width equals one meter, length – 1.5 m. Set of 34 panels gives the total of ~50 m.

Model summary is given in tab. 1. Fig. 9 shows the force on the interface between the first additional panel and KA. Since the maximum bending moment appears in the first hinge under the system deployment, the system also gains the maximum force.

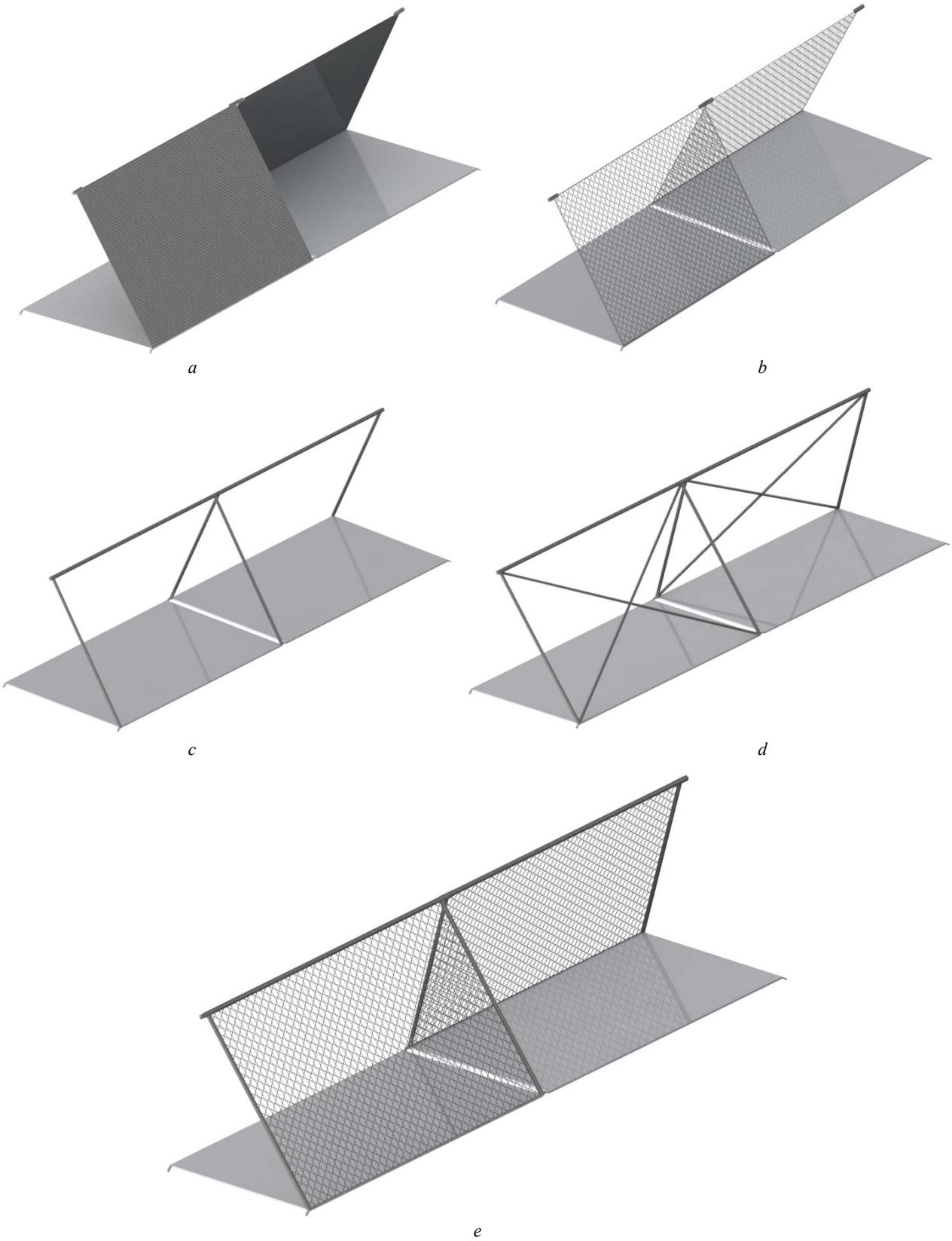


Fig. 4. Design variants of additional elements:
a – using membranes; *b* – using lattice membranes;
c, *d* – using tubes; *e* – combined version

Рис. 4. Варианты исполнения дополнительных элементов:
а – с использованием тонкостенных пластин; *б* – с использованием сетчатых тонкостенных пластин; *в*, *г* – с использованием труб; *д* – комбинированное исполнение

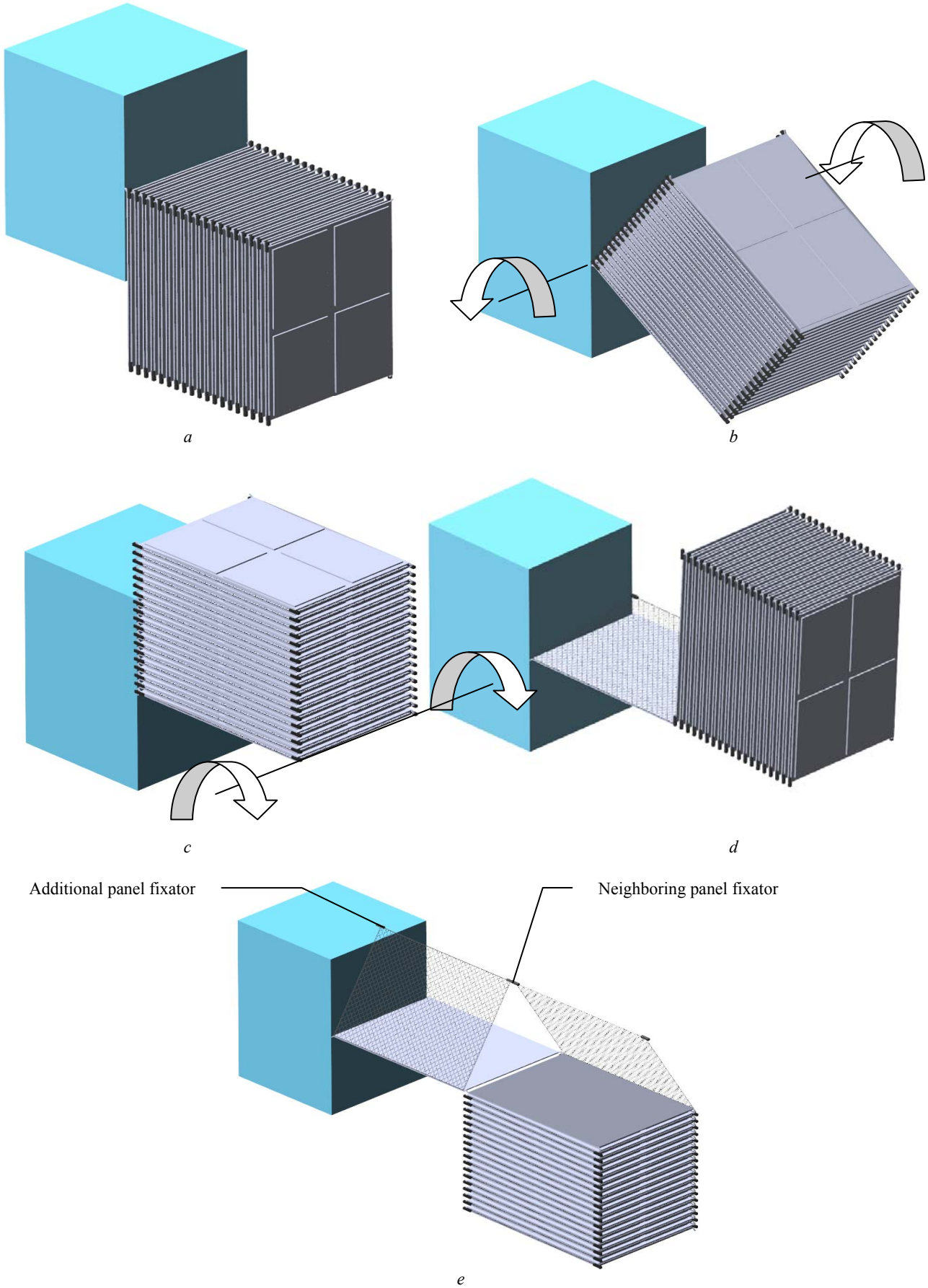


Fig. 5. Deployment stages

Рис. 5. Этапы раскрытия конструкции

In order to ensure a tightening force of 300 N, the linear dimensions of the neodymium magnet should be as follows: width a = 30 mm, height b = 30 mm, length l = 10 mm. The weight of one magnet with the above dimensions will be 65 grams.

By applying the fast Fourier transform (FFT) to this graph, we receive maximum perturbation frequency [11]. The graph of the function obtained through the Fourier filter is presented in fig. 10.

The graph shows that the most perturbations in the system occur at the frequency of 0.125 Hz, which corresponds to the first frequency of the structure vibration.

Modal analysis. A modal analysis is performed to confirm the requirement for the structure's first eigenfrequency vibrations [12]. The lower bound of the first eigenfrequency in 0.1 Hz is set as the criterion. Fig. 11 shows the finite element model (FEM) of the system in different configurations. Honeycomb panels are simulated using LAMINATE elements, additional plates by PLATE elements, pipes by BEAM elements (Circularbar). Honeycomb panels consist of two carboned patches with a thickness of 0.00035 m and an aluminum honeycomb filler of 0.0193 m. Panel total thickness is 2 cm. The upper tube has a diameter of 0.05 m and a wall thickness of 0.0012 m. The tubes connecting the honeycomb panel and the upper tube have a diameter of 0.03 m. The solver uses the NASTRAN calculation set [13–15].

Tab. 2 gives the summary of the modal analysis results.

Conclusion. This article provides a design option for a mechanical system to host a payload. Approaches to solving various design tasks are shown. Based on the calculation of deployment performance, the materials and configuration of hinges elements are selected. Modal analysis has shown that the design satisfies the requirement for the first eigenfrequency of vibrations.

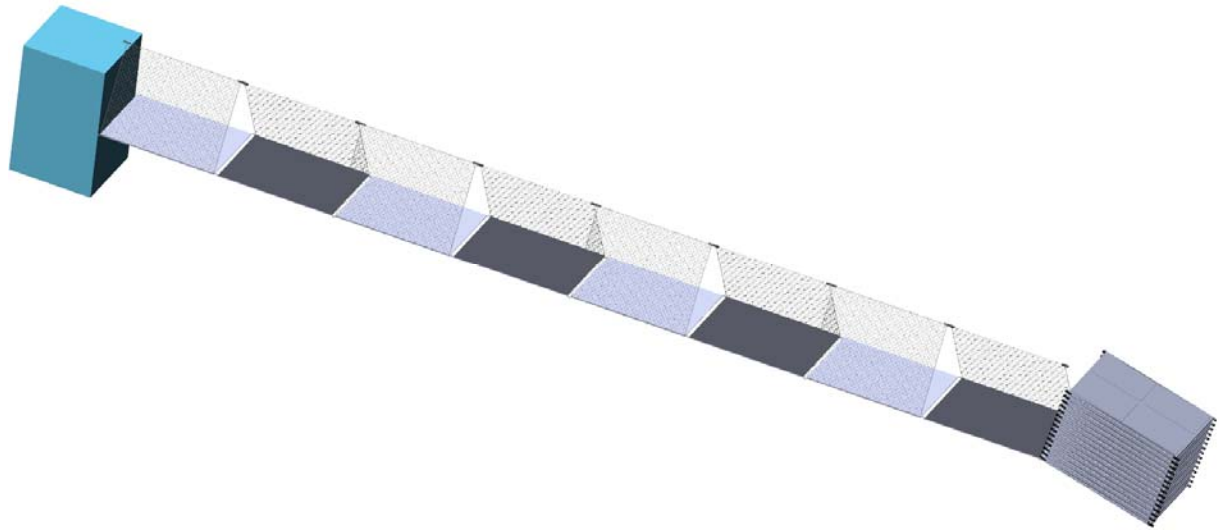


Fig. 6. Partially deployed construction

Рис. 6. Частично раскрытая конструкция

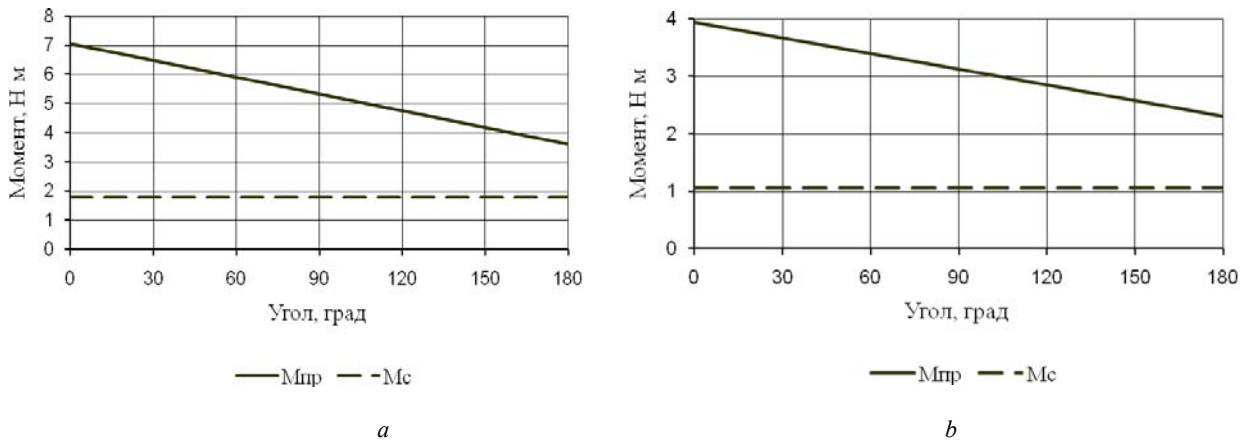


Fig. 7. Driving moment diagram of different hinges: a – driving moment in first hinge; b – driving moment in last hinge, driving moment in additional panel hinge

Рис. 7. Диаграмма действия пружины в различных ШУ: a – момент в ШУ первой панели; $б$ – момент в ШУ последней панели, момент в ШУ боковых панелей

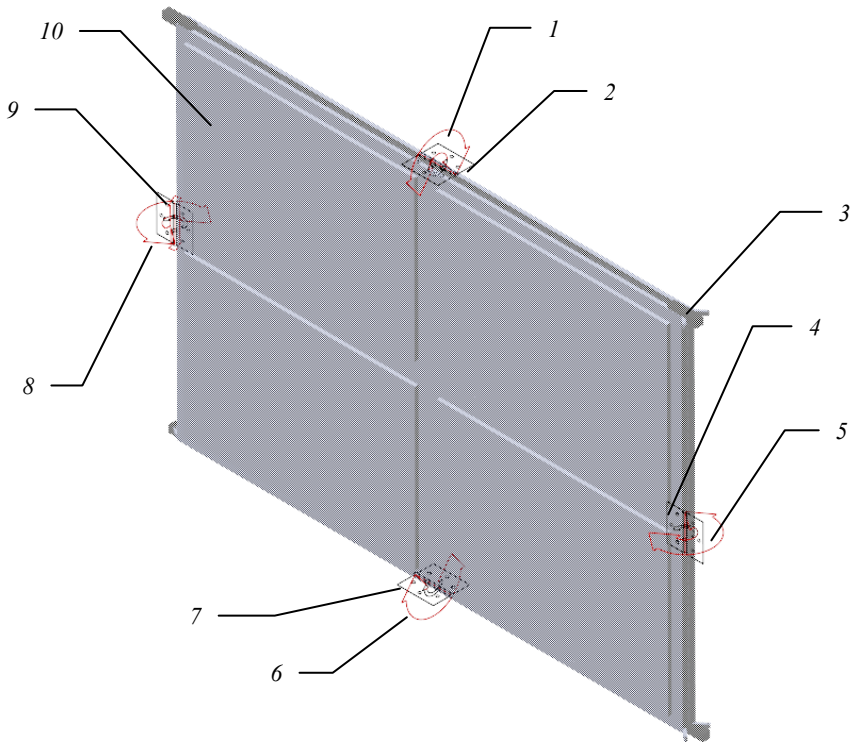


Fig. 8. Dynamic analysis model: *1* – driving moment and delay mechanism in second additional panel hinge; *2* – revolute joint in second additional panel hinge; *3* – neighbor additional panel fixator; *4* – revolute joint in first panel hinge; *5* – driving moment and delay mechanism in first panel hinge; *6* – driving moment and delay mechanism in first additional panel hinge; *7* – revolute joint in first additional panel hinge; *8* – driving moment and delay mechanism in second panel hinge; *9* – revolute joint in second panel hinge; *10* – first panel

Рис. 8. Динамическая модель двух панелей: *1* – активные силы, моделирующие движущий момент и узел задержки в ШУ второй боковой панели; *2* – вращательный шарнир второй боковой панели; *3* – элемент, моделирующий зачековку смежных боковых панелей; *4* – вращательный шарнир в ШУ первой панели; *5* – активные силы, моделирующие движущий момент и узел задержки в ШУ первой панели; *6* – активные силы, моделирующие движущий момент и узел задержки в ШУ первой боковой панели; *7* – вращательный шарнир первой боковой панели; *8* – активные силы, моделирующие движущий момент и узел задержки в ШУ второй панели; *9* – вращательный шарнир в ШУ второй панели; *10* – первая панель

Table 1

Deployment performance model's units

Unit title	Number
Parts	76
Revolute Joint	76
Fixed Joint	37
Single Component Force	114

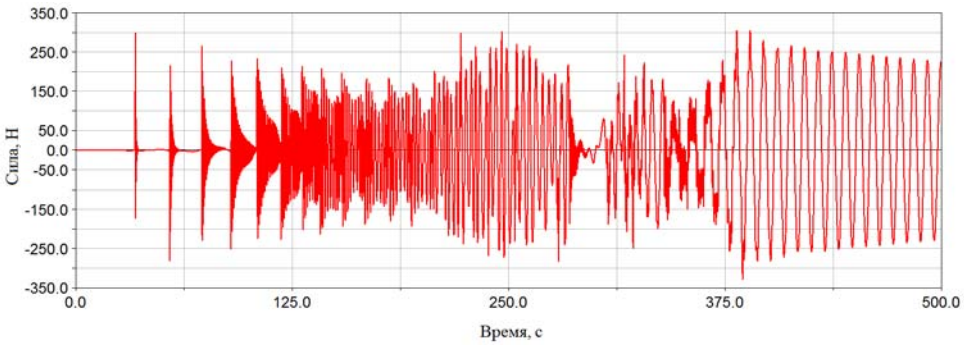


Fig. 9. Neighbor panel fixator maximum force diagram

Рис. 9. Максимальная сила, действующая в узле зачековки боковых панелей

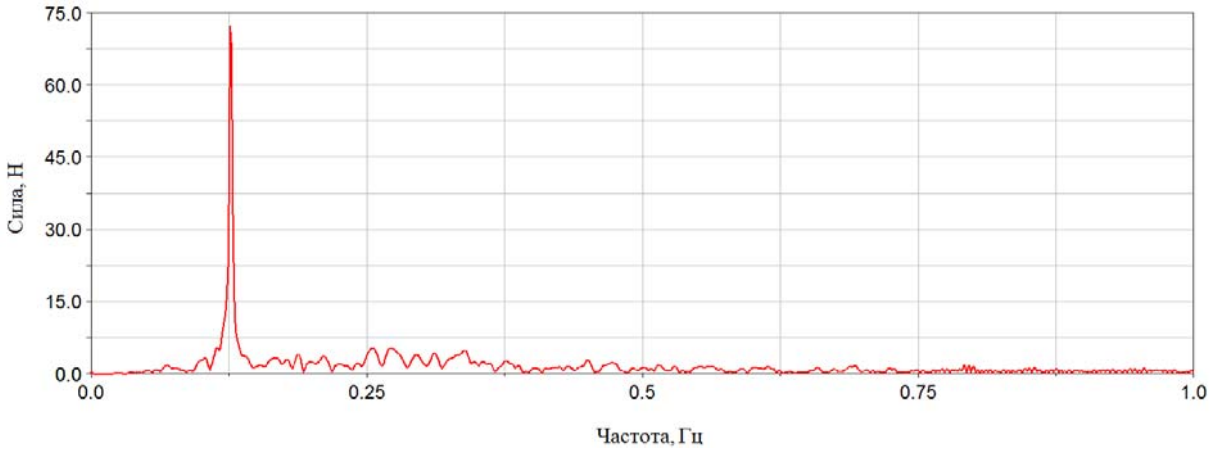


Fig. 10. Maximum perturbation frequency

Рис. 10. Частота наибольших возмущений

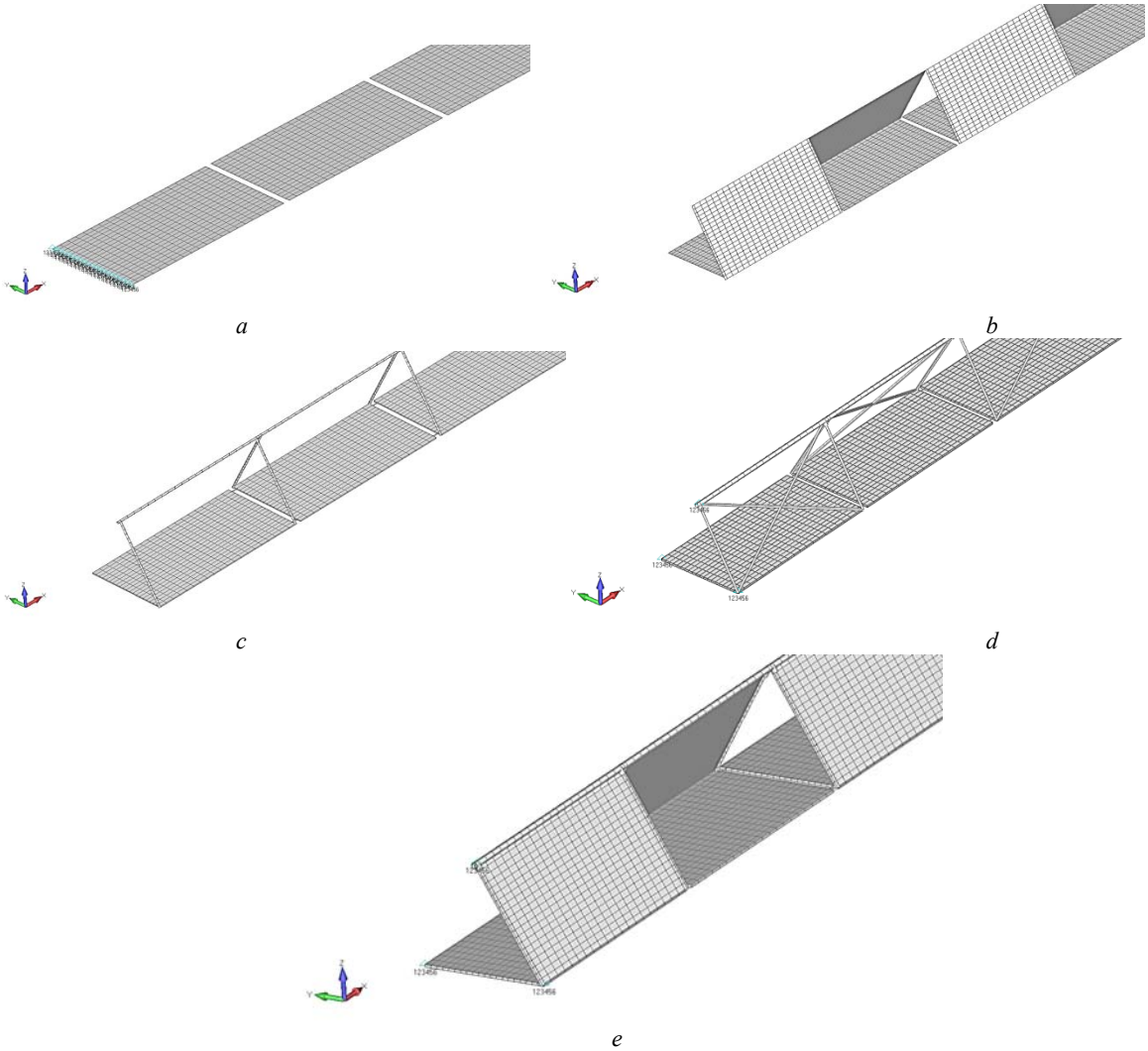


Fig. 11. FEM of construction. Design variants:
a – without additional elements; *b* – using membranes;
c, *d* – using tubes; *e* – combined version

Рис. 11. КЭМ конструкции. Варианты исполнения:
а – без дополнительных элементов; *б* – с использованием тонкостенных пластин; *в*, *г* – с использованием труб; *д* – комбинированное исполнение

Table 2

Values for the first eigenfrequency vibrations for different constructions

Section size, m	Sections number	First eigenfrequency Hz				
		fig. 11, *a*	fig. 11, *b*	fig. 11, *c*	fig. 11, *d*	fig. 11, *e*
1	47	0.007	0.1	0.13	0.17	0.178
1.2	40	0.007	0.1	0.128	0.18	0.184
1.6	30	0.008	0.12	0.11	0.2	0.2
2	24	0.006	0.2	0.19	0.25	0.28

Further research, such as an analysis of the deployment reliability required to predict the probability of a product's fail-free operation, a mechanical analysis that shows the strength properties of the structure, the buckling calculation that determines conditions for preserving the structure form and other types of calculations will make clear conclusions about the correctness of the design decisions.

Achnowledgements. The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the unique identifier of the project – RFMEFI57517X0144.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57517X0144.

References

1. Imbriale W. A., Gao S., Boccia L. Space antenna handbook. Chichester, WestSussex, UK: John Wiley & Sons Ltd. 2012, 98 p.

2. Imbriale W. A. Spaceborne antennas for planetary exploration. Hoboken, NewJersey, John Wiley & Sons Ltd, 2006, 23 p.

3. Shatrov A. K., Nazarova L. P., Mashukov A. V. *Osnovy konstruirovaniya mekhanicheskikh ustroystv kosmicheskikh apparatov. Konstruktivnye resheniya, dinamicheskie kharakteristiki* [Bases of designing of mechanical devices of spacecrafts. Constructive decisions, dynamic characteristics]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009, 144 p.

4. Guest S. D., Pellegrino S. A new concept for solid surface deployable antenna. *Acta Astronautica*. 1996, Vol. 38 (2), P. 103–113.

5. Norton R. L. Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines. McGraw Hill Higher Education, Boston. 2004, P. 403–408.

6. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Bases of design of spacecrafts of information support]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2011, 488 p.

7. Feng C. M., Liu T. S. A bionic approach to mathematical modeling the fold geometry of deployable reflector antennas on satellites. *Acta Astronautica*. 2014, Vol. 103, P. 36–44.

8. ADAMS MSC. Quick reference guide. USA: MSC Software Corporation. 2013.

9. Zhengrong Ch., Zongquan Deng, Xiaozhi Qi, Bing Li. Modeling and analysis of a large deployable antenna structure. *Acta Astronautica.* 2014, Vol. 95, P. 51–60.

10. Romanov A. V., Testoedov N. A. *Osnovy proektirovaniya informatsionno-upravlyayushchikh i mekhanicheskikh sistem kosmicheskikh apparatov* [Bases of design of information-operating and mechanical systems of spacecrafts]. St. Petersburg, Professional Publ., 2015, 240 p.

11. Tibert A. G. Deployable tensegrity structures for space applications, Department of Mechanics. Royal Institute of Technology, Sweden. 2002, P. 165–169.

12. Puig L., Barton A., Rando N. A review on large deployable structures for astro-physics missions. *Acta Astronaut.* 2010, Vol. 67, P. 12–26.

13. Dybdal R. *Communication satellite antennas: system architecture, technology, and evaluation.* New York: McGraw-Hill. 2009, 391 p.

14. Rychkov S. P. *Modelirovanie konstrukciy v srede Femap with NX Nastran* [Structure simulation in Femap with NX Nastran sphere]. Moscow, DMK Press Publ., 2013, 784 p.

15. Nastran MSC. Quick reference guide. USA: MSC Software Corporation; 2011.

Библиографические ссылки

1. Imbriale W. A., Gao S., Boccia L. Space antenna handbook. Chichester, WestSussex, UK : John Wiley & Sons Ltd, 2012. 98 с.

2. Imbriale W. A. Spaceborne antennas for planetary exploration. Hoboken, NewJersey : John Wiley & Sons Ltd, 2006. 23 с.

3. Шатров А. К., Назарова Л. П., Машуков А. В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики // Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 144 с.

4. Guest S. D., Pellegrino S. A new concept for solid surface deployable antenna // Acta Astronautica. 1996. № 38 (2). 103–113 с.

5. Norton R. L. Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines / McGraw Hill Higher Education. Boston, 2004. 403–408 с.

6. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488–489 с.

7. Feng C. M., Liu T. S. A bionic approach to mathematical modeling the fold geometry of deployable reflector antennas on satellites // Acta Astronautica1. 2014. № 03. 36–44 с.

8. ADAMS MSC. Quick reference guide. USA : MSC Software Corporation, 2013.

9. Modeling and analysis of a large deployable antenna structure / Chu Zhengrong [et al.] // Acta Astronautica. 2014. № 95. 51–60 с.

10. Романов А. В., Тестоедов Н. А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. СПб. : Профессионал, 2015. 240 с.

11. Tibert A. G. Deployable tensegrity structures for space applications, Department of Mechanics / Royal Institute of Technology. Sweden, 2002. 165–169 с.

12. Puig L., Barton A., Rando N. A review on large deployable structures for astro-physics missions // Acta Astronaut. 2010. № 67. 12–26 с.

13. Dybdal R. Communication satellite antennas: system architecture, technology, and evaluation. New York : McGraw-Hill, 2009. 391 с.

14. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NXNastran. М. : ДМКПресс, 2013. 784 с.

15. Nastran MSC. Quick reference guide. USA : MSC Software Corporation, 2011.

© Kazantsev Z. A., 2017

УДК 519.8

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 868–875

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. Б. Калошин*, А. Г. Харламов, В. О. Скрипачев, И. В. Суровцева, В. К. Иванов

Московский технологический университет (МИРЭА)
Российская Федерация, 119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
*E-mail: kaloshin@mirea.ru

Предлагается использовать методы системного анализа при проектировании и комплектовании малых космических аппаратов. Показано, что перспективный малый космический аппарат может быть представлен как совокупность технических подсистем, которые характеризуются различными параметрами: показателями назначения, показателями надежности (безотказности, долговечности, ремонтопригодности), показателями технологичности, показателями стандартизации и унификации. Применен системный подход к выбору рационального состава комплекса бортовых приборов целевого назначения. Обоснована актуальность космического мониторинга средствами бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов с целью получения информативных источников геофизического назначения. Рассмотрены физические явления, связанные с сейсмической активностью и регистрируемые комплексом приборов малых космических аппаратов. Приведены результаты анализа литературных источников, содержащих предвестниковую информацию. Предложена методика выбора информативных спутниковых данных, получаемых бортовыми геофизическими приборами, комплектация которых определяется требованиями к их составу и техническим характеристикам малых космических аппаратов. Проведено экспертное оценивание основных источников предвестниковой информации и программно реализован метод парных сравнений с учетом «порогового принципа», исходя из актуальности предвестника землетрясения, экономической обоснованности и реализуемости приборов. Получен значимый коэффициент конкордации, который свидетельствует о сильной связи между оценками экспертов. Приведены результаты расчета приоритетности показателей предвестниковой информации, исходя из обозначенных критериев. Предложена визуализация результатов селекции предвестниковой информации. Обоснована применимость и оптимальный состав бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов для диагностики сейсмической активности. Определены перспективы развития космической системы мониторинга предвестников землетрясений. Реализованный системный подход может быть использован при формировании облика перспективных малых космических аппаратов различного назначения, в том числе для решения задач дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: малый космический аппарат, бортовая научная аппаратура, геофизический мониторинг, экспертный метод, критерии отбора, метод парных сравнений, коэффициент конкордации.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 868–875

SYSTEM APPROACH OF SELECTION TO PURPOSE DESIGNED EQUIPMENT OF SMALL SPACECRAFT

I. B. Kaloshin*, A. G. Kharlamov, V. O. Skripachev, I. V. Surovceva, V. K. Ivanov

Moscow Technological University (MIREA)
78, Vernadsky Av., Moscow, 119454, Russian Federation
*E-mail: kaloshin@mirea.ru

It is proposed to use methods of system analysis in designing small spacecraft. It is shown that a perspective small spacecraft can be represented as a set of technical subsystems that are characterized by various parameters: target indicators, reliability indicators (reliability, durability, maintainability), processability indicators, standardization and unification. A systematic approach to the selection of the rational composition of a set of on-board instrumentation for a specific purpose was adopted. We prove the urgency of space monitoring by means of onboard scientific equipment (OSE) of small spacecraft (SS), with the purpose of receiving geophysical data. We consider physical phenomena associated with seismic activity and registered by a number of SS instruments. We present an analysis of publications that demonstrate the possibility of space monitoring of seismic activity. We propose methodology for analyzing satellite data obtained by onboard geophysical instruments, the composition of which depends on content requirements and technical SS characteristics. We conducted an expert review of the sources of basic predictive information. To choose the criteria, we implemented the method of paired comparisons with the "threshold principle". The criteria chosen were: the

urgency of the earthquake precursor, and the economic validity and feasibility of the instruments's creation. A significant concordance coefficient has been obtained, it indicates a rigid coupling between the experts' assessments. The results of calculating the priority of predictive information indicators are presented, based on the indicated criteria. We proposed the visualization of the selection of the predictive information results. We validated the applicability and optimal composition of on-board scientific equipment (OSE) of SS to diagnose the seismic activity. Finally, we determined the prospects of developing a space monitoring system for earthquake precursors. The realized system approach can be used for forming the appearance of perspective small spacecraft for various purposes, including for solving problems of remote sensing of the Earth.

Keywords: Small spacecraft, on-board scientific equipment, geophysical monitoring, expert method, selection criteria, paired comparisons, concordance coefficient.

Введение. Современные космические системы используются для решения широкого круга прикладных задач: спутниковая связь, дистанционное зондирование Земли, навигация, исследование Солнечной системы и т. д. Задача обеспечения высокой эффективности и результативности для различных космических систем является весьма актуальной.

В последнее десятилетие стали востребованными разработка, производство и эксплуатация малых космических аппаратов (МКА) с массой до 100 кг, которые наиболее экономически обоснованы, чем тяжелые космические аппараты.

На различных этапах проектирования сложных технических систем, в том числе и МКА, необходимо использование методов системного анализа [1]. Поскольку МКА обладают существенными ограничениями по массе, габаритам, энергопотреблению и другим техническим параметрам, то одной из задач системного анализа является выбор и обоснование рационального состава комплекса приборов целевого назначения.

В состав МКА входят служебные и целевые средства бортовой аппаратуры, рассматриваемые как подсистемы. Поэтому перспективный МКА может быть представлен как совокупность технических подсистем, т. е.

$$C_{\text{МКА}} = \{A_1, \ \ldots, A_N\},$$

где $C_{\text{МКА}}$ – разрабатываемый МКА; A_i – его подсистемы с порядковым номером $i = 1, \ldots, N$.

При этом технические средства A_i характеризуются различными параметрами: показатели назначения, показатели надежности (безотказности, долговечности, ремонтопригодности), показатели технологичности, показатели стандартизации и унификации и др.

Для геофизического мониторинга бортовая научная аппаратура (БНА) МКА имеет потенциальные возможности решать задачи наблюдения за различными процессами и явлениями на Земле. Актуальность мониторинга предвестников землетрясений посредством БНА обусловлена высокими требованиями по оперативности получения данных, глобальности обзора поверхности Земли и достаточности набора данных по их полноте (информативности).

Процесс подготовки сильных коровых землетрясений сопровождается появлением различных предвестников: деформация земной коры, вариации электромагнитного поля, аномальные облачные образования и др. Для эффективного краткосрочного анализа предвестников сейсмической опасности необходимо использование космического сегмента, так как наземные службы недостаточно отражают изменения параметров окружающей среды в силу локализации их измерений.

Геофизические явления и бортовая научная аппаратура. Рассмотрим некоторые геофизические явления, связанные с сейсмической активностью и регистрируемые посредством БНА МКА.

Известно, что землетрясения сопровождаются развитием крупных тепловых аномалий, которые возникают за 2–3 недели до события и существуют в течение 1–2 дней после него. Интенсивность таких аномалий обычно составляет 3–4 °С, причём нагревается не только земная поверхность, но и воздух над эпицентром. Эти аномалии можно зафиксировать оптическими средствами, работающими в ИК-диапазоне, посредством сканирующих радиометров [2].

Целесообразно учитывать результаты и линеаментного анализа космических изображений подстилающей поверхности в различных областях спектра: зеленой, красной и ближней ИК-диапазона. В сейсмических регионах локальные линеаменты лучше всего выражаются на космических изображениях, сформированных в зеленой зоне спектра, а региональные, как правило, – в ближнем ИК-диапазоне. Поэтому с целью сохранения максимальной информативности космических изображений и экономии времени на их обработку полезно использовать промежуточную (красную) зону спектра: $\Delta\lambda = 620–690$ мкм [3].

Наиболее информативным представляется использование космической тепловой съемки в комплексе с другими спутниковыми методами. Среди таких методов могут быть названы радиолокационная интерферометрия, наблюдения за вариациями параметров ионосферы. Так, в [4] приведены результаты обработки измерений бортовым прибором ISL KA DEMETER, где обнаружено значительное увеличение плотности электронов за ~ 4 дня до сейсмического события в Самоа 29.09.2009 г.

Увеличение шумов в частотном диапазоне 100–500 Гц регистрировалось за 14 часов до землетрясения на низкоорбитальных космических аппаратах над эпицентром землетрясения при $M > 5{,}4$. Эффект аномального увеличения интенсивности низкочастотных радиоволн (0,1–15 кГц) в моменты землетрясений фиксировался как магнитной, так и электрической антенной. Также фиксировались изменения фазы низкочастотных сигналов, трассы распространения которых проходили через сейсмоактивный район [5; 6]. В [7] обнаружена пространственно-временная

корреляция сильных литосферных землетрясений и вариаций потока энергичных частиц внутреннего радиационного пояса.

К составу комплексов бортовой научной аппаратуры, предназначенной для обнаружения предвестников землетрясений, выдвигается ряд основных требований:

– максимальная эффективность;

– габаритно-весовые характеристики и электромагнитная совместимость;

– учет требований по механическим, тепловым, электрическим и другим характеристикам, предъявляемых к научной аппаратуре малых космических аппаратов.

Рассмотрим возможности комплекса приборов МКА геофизического назначения.

1. Ионозонды. Одним из эффективных средств научной аппаратуры для решения задачи обнаружения предвестников сейсмической активности является ионозонд. Он проводит импульсное зондирование ионосферы, предоставляя оперативную информацию о ее состоянии, включая значение критической частоты f_0 слоя $F2$ ионосферы и электронной концентрации. Опыт применения таких приборов показывает возможность оперирования более чем 300 фиксированными частотами в диапазоне 0,3–15,95 МГц для высот от 400 до 1000 км [8].

2. Детекторы заряженных частиц. Основное назначение – регистрация протонов и электронов с энергиями в диапазонах 20 кэВ – 2 МэВ. Такие приборы широко использовались на низкоорбитальных и высокоапогейных космических аппаратах. На борту «Метеор-3М» прошел успешную проверку детектор МСГИ-5ЕИ для измерения дифференциальных спектров как электронной, так и ионной (протонной) компонент геоактивных корпускулярных излучений. В настоящее время подобные комплексы установлены на борту космических аппаратов «Метеор-М» № 1, № 2.

3. Радиомаяки. Такие приборы необходимы для радиотомографии ионосферы. Приемники могут работать, например, на частотах 150 и 400 МГц или 1,575 и 1,227 ГГц (частоты навигационных космических аппаратов). Метод радиотомографии дает возможность получать разрез плотности ионосферы по горизонтали и вертикали в масштабах на тысячи километров.

4. Волновые комплексы низкочастотного диапазона. Для регистрации аномалий в низкочастотном диапазоне необходимы приборы, которые позволят проводить изучение непрерывных шумовых сигналов, появляющихся в ионосфере перед землетрясением. Для оценки изменений, происходящих в свойствах сигналов, оптимально использовать прибор, работающий в диапазоне от 10 Гц до 20 кГц, поскольку большинство экспериментальных данных соответствует этому частотному диапазону.

5. Радиометры. Обработка изображений, получаемых как в видимом, так и в ИК-диапазонах, позволяет выделить ряд предвестниковых факторов, таких как температурные аномалии, линеаменты облачного покрова и другие метеорологические предвестники. Примером может быть радиометр AVHRR, установленный на борту космических аппаратов семейства NOAA, и приборы типа МСУ космических аппаратов «Метеор-М» № 1, № 2 [2]. Также указанные явления фиксируются пассивными СВЧ-радиометрами типа МТВЗА, осуществляющими прием СВЧ-излучения с вертикальной и горизонтальной поляризацией с пространственным разрешением 20–100 км и полосой обзора 1100 м.

6. Масс-спектрометры. Масс-спектрометры позволяют проводить измерения ионизированной и нейтральной составляющих ионосферной плазмы. Необходима регистрация относительного содержания концентраций ионов основных компонент ионосферной плазмы в диапазоне масс 1–65 а.е.м. с разрешением 10–15 (на уровне 10 % высоты пика).

Выбор рационального состава целевой аппаратуры малых космических аппаратов. Для оценивания возможностей применения БНА МКА в интересах краткосрочного прогнозирования землетрясений прежде всего необходим выбор наиболее приоритетных источников спутниковой информации, для чего и предлагается следующий методический аппарат. Методика базируется на экспертном методе и методе парных сравнений с учетом «порогового принципа». В табл. 1 представлены основные источники предвестниковой информации [5].

Предлагаемая методика основывается на обработке данных по основным источникам предвестниковой информации, заполнении экспертами таблиц, исходя из трех критериев: актуальность предвестника, экономическая обоснованность и приборная реализуемость.

Для экспертного оценивания привлекались сотрудники ИКИ РАН, МИРЭА, АО «Российские космические системы», ИРЭ РАН с учетом их одинаковой компетентности ($M = 7$).

При получении парных сравнений объектов $A_i\left(i=\overline{1,n}\right)$ используется метод анкетирования, предусматривающий заполнение каждым экспертом матриц с одинаковым числом строк и столбцов (табл. 2).

Таблица 1

Источники спутниковой информации

№ п/п	Предвестниковая информация
A_1	Вариации температуры поверхности Земли
A_2	Вертикальные профили температуры и влажности воздуха
A_3	Облачные аномалии
A_4	Аномальные потоки скрытой теплоты испарения
A_5	Ветры на высоте 9–12 км
A_6	Аномалии потока уходящего длинноволнового излучения OLR
A_7	Температура приповерхностного слоя воздуха

Окончание табл. 1

№ п/п	Предвестниковая информация
A_8	Концентрации, температуры ионов и электронов. Вертикальные профили электронной концентрации
A_9	Массовый состав и концентрация основных ионов
A_{10}	КНЧ- и ОНЧ-излучения, измеряемые бортовой научной аппаратурой
A_{11}	Квазипостоянные магнитные и электрические поля
A_{12}	Потоки высыпающихся частиц

Таблица 2

Обобщенный вид матрицы экспертного оценивания

Источники	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
A_1	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$	$a_{1,6}$	$a_{1,7}$	$a_{1,8}$	$a_{1,9}$	$a_{1,10}$	$a_{1,11}$	$a_{1,12}$
A_2	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$	$a_{2,6}$	$a_{2,7}$	$a_{2,8}$	$a_{2,9}$	$a_{2,10}$	$a_{2,11}$	$a_{2,12}$
A_3	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$	$a_{3,6}$	$a_{3,7}$	$a_{3,8}$	$a_{3,9}$	$a_{3,10}$	$a_{3,11}$	$a_{3,12}$
A_4	$a_{4,1}$	$a_{4,2}$	$a_{4,3}$	$a_{4,4}$	$a_{4,5}$	$a_{4,6}$	$a_{4,7}$	$a_{4,8}$	$a_{4,9}$	$a_{4,10}$	$a_{4,11}$	$a_{4,12}$
A_5	$a_{5,1}$	$a_{5,2}$	$a_{5,3}$	$a_{5,4}$	$a_{5,5}$	$a_{5,6}$	$a_{5,7}$	$a_{5,8}$	$a_{5,9}$	$a_{5,10}$	$a_{5,11}$	$a_{5,12}$
A_6	$a_{6,1}$	$a_{6,2}$	$a_{6,3}$	$a_{6,4}$	$a_{6,5}$	$a_{6,6}$	$a_{6,7}$	$a_{6,8}$	$a_{6,9}$	$a_{6,10}$	$a_{6,11}$	$a_{6,12}$
A_7	$a_{7,1}$	$a_{7,2}$	$a_{7,3}$	$a_{7,4}$	$a_{7,5}$	$a_{7,6}$	$a_{7,7}$	$a_{7,8}$	$a_{7,9}$	$a_{7,10}$	$a_{7,11}$	$a_{7,12}$
A_8	$a_{8,1}$	$a_{8,2}$	$a_{8,3}$	$a_{8,4}$	$a_{8,5}$	$a_{8,6}$	$a_{8,7}$	$a_{8,8}$	$a_{8,9}$	$a_{8,10}$	$a_{8,11}$	$a_{8,12}$
A_9	$a_{9,1}$	$a_{9,2}$	$a_{9,3}$	$a_{9,4}$	$a_{9,5}$	$a_{9,6}$	$a_{9,7}$	$a_{9,8}$	$a_{9,9}$	$a_{9,10}$	$a_{9,11}$	$a_{9,12}$
A_{10}	$a_{10,1}$	$a_{10,2}$	$a_{10,3}$	$a_{10,4}$	$a_{10,5}$	$a_{10,6}$	$a_{10,7}$	$a_{10,8}$	$a_{10,9}$	$a_{10,10}$	$a_{10,11}$	$a_{10,12}$
A_{11}	$a_{11,1}$	$a_{11,2}$	$a_{11,3}$	$a_{11,4}$	$a_{11,5}$	$a_{11,6}$	$a_{11,7}$	$a_{11,8}$	$a_{11,9}$	$a_{11,10}$	$a_{11,11}$	$a_{11,12}$
A_{12}	$a_{12,1}$	$a_{12,2}$	$a_{12,3}$	$a_{12,4}$	$a_{12,5}$	$a_{12,6}$	$a_{12,7}$	$a_{12,8}$	$a_{12,9}$	$a_{12,10}$	$a_{12,11}$	$a_{12,12}$

Значение элемента, стоящего на пересечении i-й строки и j-го столбца, определяется согласно правилу [9]

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, A_i \prec A_j \\ 1, A_i \sim A_j \\ 2, A_i \succ A_j \end{cases}.$$

Метод вычисления весовых коэффициентов, в соответствии со значениями которых ранжируются объекты, представляет собой итерационную процедуру:

$$p^t = Ap^{t-1},$$

где $p^0 = (1,1, ...,1)'$.

В процессе итерирования возможно получение больших весовых значений. Чтобы этого не произошло, компоненты вектора p^t на каждом шаге нормируются путем деления на сумму:

$$\lambda^t = \sum_i p_i^t = \sum_i \sum_j a_{ij} p_j^{t-1}.$$

С учетом нормирующего множителя процедура вычисления весовых коэффициентов записывается как

$$p^t = \frac{1}{\lambda^t} Ap^{t-1}.$$

Вычислительный процесс продолжается до момента, когда весовые коэффициенты, полученные на соседних итерациях, будут незначительно отличаться друг от друга, т. е.

$$\max\left|p_i^t - p_i^{t-1}\right| < \varepsilon,$$

где ε – достаточно малое положительное число, задающее точность расчетов.

Оценка приоритетности предвестниковой информации по каждому критерию проводилась отдельно. Итоговая групповая оценка была получена усреднением значений индивидуальных оценок экспертов.

Для оценки значимости результатов экспертного оценивания использовалось ранжирование. Каждому значению параметров A_1, …, A_{12} присваивался ранг – порядковый номер, расположенный в порядке возрастания этих параметров.

Для определения тесноты связи между рангами параметров A_1, …, A_{12} определялся коэффициент конкордации. Поскольку ранги являются несвязными, то коэффициент конкордации будет определяться как [10]

$$W = \frac{12S}{m^2\left(n^3 - n\right)},$$

где $m = 3$ – количество критериев; $n = 12$ – количество параметров A_1, …, A_{12}; S – разность между суммой квадратов рангов и средним квадратом рангов, определяемая по формуле

$$S = \sum_m^n \left(\sum_j^m R_{ij}\right)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij}\right)^2}{n},$$

где R_{ij} – ранг, присвоенный i-му значению j-го признака.

В результате расчетов $S = 823$, $W = 0{,}639$.

Значимость коэффициента конкордации оценивается по χ^2-критерию Пирсона. Расчетное значение $\chi^2_{\text{расч}}$ при отсутствии связных рангов определяется по формуле:

$$\chi^2_{\text{расч}} = \frac{12S}{mn(n+1)}.$$

Расчетное значение $\chi^2_{\text{расч}} = 21{,}1$ превышает табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 19{,}675$ при заданном уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и числе степеней свободы $\nu = n - 1 = 11$,

поэтому коэффициент конкордации признается значимым, что свидетельствует о сильной связи между оценками экспертов.

Применив относительное нормирование по максимальному значению, были получены показатели, которые характеризуют степень соответствия предвестниковой информации заданным критериям (табл. 3).

Выявление наиболее значимой предвестниковой информации проводилось по «пороговому принципу». Пороговое значение для A_i определялось с помощью средневзвешенного значения:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_i W_i V_i}{\sum_{i=1}^{N} W_i V_i},$$

где L – средневзвешенное значение («порог»); N – количество признаков; C_i – средняя арифметическая мнений экспертов по i-му признаку; V_i – «литературный вес» по каждому i-му признаку.

Для расчета «литературного веса» параметров A_1, …, A_{12} были проанализированы имеющиеся литературные источники (табл. 4):

$$W_i = \frac{C_i}{\max_i - \min_i},$$

где W_i – «практический вес», который отражает значимость A_i по мнению экспертов; $\max_i$, $\min_i$ – значения мнений экспертов по A_i.

Нормированные параметры A_1, …, A_{12} и полученное пороговое значение $L = 0{,}92$ показаны на рисунке.

Как видно на рисунке, наибольшей значимостью при геофизическом мониторинге обладают параметры A_3, A_7, A_8, A_{10}. По результатам проведенного экспертного оценивания для обнаружения краткосрочных предвестников землетрясений целесообразно диагностировать выявленные параметры и иметь в составе БНА МКА приборы, фиксирующие:

– концентрацию, температуру ионов и электронов, вертикальные профили электронной концентрации;

– температуру приповерхностного слоя воздуха;

– КНЧ- и ОНЧ-излучения, измеряемые бортовой научной аппаратурой;

– облачные аномалии.

Таблица 3

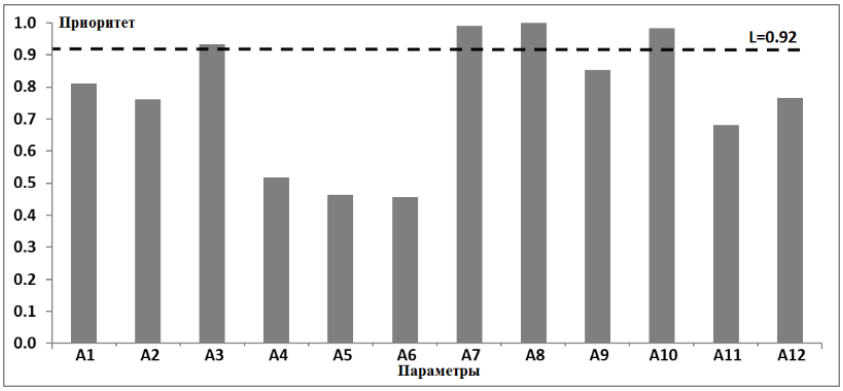
Результаты расчета показателей приоритета предвестниковой информации

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
0,81	0,76	0,93	0,52	0,46	0,46	0,99	1,00	0,85	0,98	0,68	0,77

Таблица 4

Результаты анализа литературных источников

№ п/п	Литературные источники, содержащие предвестниковую информацию	V
A_1	[5; 2; 11–14]	0,24
A_2	[3; 5; 11–13; 15–17]	0,32
A_3	[3; 5; 13]	0,12
A_4	[3; 5; 11; 12; 16]	0,20
A_5	[5]	0,04
A_6	[2; 3; 5; 8; 11; 14–16]	0,32
A_7	[5; 11–13; 15–17]	0,28
A_8	[3–5; 8; 11; 12; 16; 18–26]	0,64
A_9	[4; 5; 8; 11; 12; 18–20; 26]	0,36
A_{10}	[5; 8; 11; 17; 18; 22; 27; 28]	0,32
A_{11}	[3; 5; 8; 12; 16; 19; 22]	0,32
A_{12}	[5; 11; 18; 22; 29; 30]	0,24



Визуализация результатов селекции предвестниковой информации

Visualization of the results of selection of predictive information

Отметим, что в работе [31] предложенная методика использовалась с меньшим числом критериев, где наряду с параметрами A_3, A_7, A_8, A_{10} были выявлены A_9, A_{12}: массовый состав и концентрация основных ионов, а также потоки высыпающихся частиц соответственно. Таким образом, приборы, регистрирующие параметры A_9, A_{12}, могут быть дополнительно установлены на МКА.

Заключение. Предложена методика выбора наиболее информативных спутниковых данных, получаемых бортовыми приборами, комплектация которых должна определяться исходя из технических характеристик МКА, состава орбитальной группировки и вышеприведенных требований. Основными приборами могут быть:

– приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (двухчастотный, с темпом измерений не ниже 20 Гц, имеющий не менее 2-х антенн, ортогональных по оси X) для радиозатменного зондирования или Легмюровский зонд;

– камера ИК-диапазона с разрешением 15–250 м в полосе обзора до 700 км и разрешающей способностью не хуже 5 К;

– низкочастотный волновой комплекс для исследования непрерывных шумовых сигналов в ионосфере в частотном диапазоне от 20 Гц до 20 кГц.

Полученные результаты позволяют оценить оптимальный состав и технические характеристики бортовой научной аппаратуры МКА геофизического назначения и определить перспективы развития космической системы мониторинга сейсмической активности.

Дальнейшее повышение достоверности определения места, времени и интенсивности сейсмического события может быть достигнуто путем сочетания спутниковых данных с результатами наземных измерений [32; 33].

Библиографические ссылки

1. Комплексное определение рационального состава информационно-технических систем / В. О. Скрипачев [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Vol. 5, no.4. P. 7–11.
2. Tronin A. A. Satellite remote sensing in seismology. A review // Remote Sens. 2010. Vol. 2, No. 1. P. 124–150.
3. The First Results of the Pilot Project on Complex Diagnosing Earthquake Precursors on Sakhalin / S. A. Pulinets [et al.] // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. Vol. 49, No. 1. P. 115–123.
4. Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M. R. Electron and ion density variations before strong earthquakes (/M/>6,0) using DEMETER and GPS data // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 10. P. 7–18.
5. Pulinets S., Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer, 2005. P. 285.
6. Hayakawa M., Molchanov O. A. Effect of Earthquakes on lower ionosphere as found by subionospheric VLF propagation // Adv. Space Res. 2000. Vol. 26, No. 8. P. 1273–1276.
7. Sidiropoulos N. F., Anagnostopoulos G., Rigas V. Comparative study on earthquake and ground based transmitter induced radiation belt electron precipitation at middle latitudes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. Vol. 11. P. 1901–1913.
8. Pulinets S. A. Strong Earthquakes Prediction Possibility With the Help of Topside Sounding From Satellites // Adv. Space Res. 1998. Vol. 21, No. 3. P. 455.
9. Давнис В. И., Тинякова В. В. Прогнозные модели экспертных предпочтений. Воронеж : Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2005. 244 с.
10. Улитина Е. В., Леднева О. В., Жирнова О. Л. Статистика : учеб. пособие. 3-е изд. стереотип. М. : Московская финансово-промышленная академия, 2011. 312 с.
11. Pulinets S. A. Space technologies for short-term earthquake warning // Advances in Space Research. 2006. Vol. 37, No. 4. P. 643–652.
12. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 / S. A. Pulinets [et al.] // Annales Geophysicae. 2006. Vol. 24. P. 835–849.
13. Pulinets S. A., Morozova L. I., Yudin I. A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle // Research in Geophysics. 2014. Vol. 4, No. 1. P. 45–50.
14. Thermal infrared anomalies associated with multi-year earthquakes in the Tibet region based on China's FY-2E satellite data / X. Lu [et al.] // Advances in Space Research. 2016. Vol. 58, No. 6. P. 989–1001.
15. Multiparameter monitoring of short-term earthquake precursors and its physical basis. Implementation in the Kamchatka region / S. A. Pulinets [et al.] // E3S Web of Conferences. 2016. Vol. 11, No. 00019.
16. Atmospheric and ionospheric coupling phenomena related to large earthquakes / M. Parrot [et al.] // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2016. Discuss.
17. Earthquake precursor research: ground-satellite observations, laboratory experiments, and theoretical models. Preface / P. F. Biagi [et al.] // Annals of geophysics. 2012. Vol. 55. P. 1.
18. Parrot M. Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects // Adv. Space Res. 1995. Vol. 15. P. 11.
19. Ionospheric electromagnetic perturbations observed on DEMETER satellite before Chile M7.9 earthquake / X. Zhang [et al.] // Earthquake Science. 2009. Vol. 22, No. 3. P. 251–255.
20. Akhoondzadeh M., Saradjian M. K. Fusion of multi precursors earthquake parameters to estimate the date, magnitude and affected area of the forthcoming powerful earthquakes // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2012. Vol. XXXIX-B8. P. 1–6.
21. Seismo-Ionospheric Coupling Appearing as Equatorial Electron Density Enhancements Observed via DEMETER Electron Density Measurements / K. Ryu [et al.] // J. Geophys. Res. 2014. Vol. 119. P. 8524–8542.
22. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes / V. A. Liperovsky [et al.] // Geomagnetism and Aeronomy. 2008. Vol. 48, No. 6. P. 795–806.
23. Seismo-ionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M8.8 Chile earthquake / Y. Y. Hoa [et al.] // Advances in Space Research. 2013. Vol. 51, No. 12. P. 2309–2315.

24. Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC / C. C. Hsiao [et al.] // GPS Solutions, 2010. Vol. 14, No. 1. P. 83–89.

25. Ionosphere anomaly before the Wenchuan MS8.0 earthquake detected by COSMIC occultation data / X. Ma [et al.] // Acta Seismologica Sinica. 2013. Vol. 35, No. 6. P. 848–855.

26. Variations of ionospheric plasma at different altitudes before the 2005 Sumatra Indonesia Ms 7.2 earthquake / J. Liu [et al.] // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. Vol. 121. P. 9179–9187.

27. Detection of ionospheric perturbations associated with Japanese earthquakes on the basis of reception of LF transmitter signals on the satellite DEMETER / F. Muto [et al.] // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2008. Vol. 8. P. 135–141.

28. VLF/LF signal studies of the ionospheric response to strong seismic activity in the Far Eastern region combining the DEMETER and ground-based observations / A. Rozhnoi [et al.] // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2015. Vol. 85–86. P. 141–149.

29. Fidani C., Battiston R., Burger W. J. A Study of the Correlation between Earthquakes and NOAA Satellite Energetic Particle Bursts // Remote Sensing. 2010. Vol. 2. P. 2170–2184.

30. A new method to study the time correlation between Van Allen Belt electrons and earthquakes / D. Tao [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 37, No. 22. P. 5304–5319.

31. Capabilities evaluation of spaceborne scientific equipment for geophysical applications / I. Kaloshin [et al.] // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 102, No. 01024.

32. Blaunstein N. and Plohotniuc E. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar. CRC Press, 2008. P. 600.

33. Peter W. B., Chevalier M. W., Inan U. S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // Journal of geophysical research. 2006. Vol. 111, No. A03301.

References

1. Skripachev V. O., Surovtseva I. V., Umnov V. O., Kaloshin I.B., Kharlamov A. G. [Complex determining the rational composition of design of information technical systems]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2017, Vol. 5, No. 4, P. 7–11 (In Russ.).

2. Tronin A. A. Satellite remote sensing in seismology. A review. *Remote Sens.* 2010, Vol. 2, No. 1, P. 124–150.

3. Pulinets S. A., Romanov A. A., Urlichich Yu. M., Romanov A. A., Doda L. N., Ouzounov D. The First Results of the Pilot Project on Complex Diagnosing Earthquake Precursors on Sakhalin *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009, Vol. 49, No. 1, P. 115–123.

4. Akhoondzadeh M., Parrot M. and Saradjian M. R. Electron and ion density variations before strong earthquakes (/M/>6.0) using DEMETER and GPS data *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010, Vol. 10, P. 7–18.

5. Pulinets S., Boyarchuk K. *Ionospheric Precursors of Earthquakes.* Berlin, Springer, 2005. 285 p.

6. Hayakawa M., Molchanov O. A. Effect of earthquakes on lower ionosphere as found by subionospheric VLF propagation. *Adv. Space Res.* 2000, Vol. 26, No. 8, P. 1273–1276.

7. Sidiropoulos N. F., Anagnostopoulos G., Rigas V. Comparative study on earthquake and ground based transmitter induced radiation belt electron precipitation at middle latitudes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, Vol. 11, P. 1901–1913.

8. Pulinets S. A. Strong Earthquakes Prediction Possibility With the Help of Topside Sounding From Satellites. *Adv. Space Res.* 1998, Vol. 21, No. 3, P. 455.

9. Davnis V. I., Tinyakova V. V. *Prognoznye modeli ekspertnykh predpochtenii* [Forecast models of expert preferences]. Voronezh, Publishing house of Voronezh State University, 2005, 244 p.

10. Ulitina E. V., Ledneva O. V., Zhirnova O. L. *Statistika: ucheb. posobie* [Statistics: tutorial]. Ed. E. V. Ulitina, 3rd ed. stereotype. Moscow, Moscow Financial and Industrial Academy Publ., 2011, 312 p.

11. Pulinets S. A. Space technologies for short-term earthquake warning. *Advances in Space Research*. 2006, Vol. 37, No. 4, P. 643–652.

12. Pulinets S. A., Ouzounov D., Ciraolo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajecka M., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Kotsarenko A. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003. *Annales Geophysicae*. 2006. Vol. 24, P. 835–849.

13. Pulinets S. A., Morozova L. I., Yudin I. A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. *Research in Geophysics*. 2014, Vol. 4, No. 1, P. 45–50.

14. Lu X., Meng Q. Y., Gu X. F., Zhang X. D., Xie T. and Geng F. Thermal infrared anomalies associated with multi-year earthquakes in the Tibet region based on China's FY-2E satellite data. *Advances in Space Research*. 2016, Vol. 58, No. 6, P. 989–1001.

15. Pulinets S. A., Ouzounov D., Davydenko D. and Petrukhin A. Multiparameter monitoring of short-term earthquake precursors and its physical basis. Implementation in the Kamchatka region. *E3S Web of Conferences*. 2016, Vol. 11, No. 00019.

16. Parrot M., Tramutoli V., Tiger J. Y., Liu S., Pulinets A., Ouzounov D., Genzano N., Lisi M., Hattori K., Namgaladze A. Atmospheric and ionospheric coupling phenomena related to large earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2016. Discuss.

17. Biagi P. F., Contadakis M. E., Hayakawa M. and Maggipinto T. Earthquake precursor research: ground-satellite observations, laboratory experiments, and theoretical models. Preface. *Annals of geophysics*. 2012, Vol. 55, P. 1.

18. Parrot M. Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects. *Adv. Space Res.* 1995, Vol. 15, P. 11.

19. Zhang X., Qian J., Ouyang X., Shen X., Cai J., Zhao S. Ionospheric electromagnetic perturbations observed on DEMETER satellite before Chile M7.9 earthquake. *Earthquake Science*. 2009, Vol. 22, No. 3, P. 251–255.

20. Akhoondzadeh M., Saradjian M. K. Fusion of multi precursors earthquake parameters to estimate the date, magnitude and affected area of the forthcoming powerful earthquakes. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2012, Vol. XXXIX-B8, P. 1–6.

21. Ryu K., Lee E., Chae J. S., Parrot M., Pulinets S. A. Seismo-Ionospheric Coupling Appearing as Equatorial Electron Density Enhancements Observed via DEMETER Electron Density Measurements. *J. Geophys. Res.* 2014, Vol. 119, P. 8524–8542.

22. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C. V., Liperovskaya E. V. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008, Vol. 48, No. 6, P. 795–806.

23. Hoa Y. Y., Jhuanga H. K., Sua Y. C. and Liua J. Y. Seismo-ionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M8.8 Chile earthquake. *Advances in Space Research*. 2013, Vol. 51, No. 12, P. 2309–2315.

24. Hsiao C. C., Liu J. Y., Oyama K. Y., Yen N. L., Liou Y. A., Chen S. S., Miau J. J. Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC. *GPS Solutions*. 2010, Vol. 14, No. 1. P. 83–89.

25. Ma X., Lin Z., Chen H., Jin H., Li D., Jiao L. and Liu X. Ionosphere anomaly before the Wenchuan MS8.0 earthquake detected by COSMIC occultation data. *Acta Seismologica Sinica*. 2013, Vol. 35, No. 6, P. 848–855.

26. Liu J., Zhang X., Novikov V. and Shen X. Variations of ionospheric plasma at different altitudes before the 2005 Sumatra Indonesia Ms 7.2 earthquake. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2016, Vol. 121, P. 9179–9187.

27. Muto F., Yoshida M., Horie T., Hayakawa M., Parrot M. and Molchanov O. A. Detection of ionospheric perturbations associated with Japanese earthquakes on the basis of reception of LF transmitter signals on the satellite DEMETER. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008, Vol. 8, P. 135–141.

28. Rozhnoi A., Solovieva M., Parrot M., Hayakawa M., Biagi P. F., Schwingenschuh K. and Fedun V. VLF/LF signal studies of the ionospheric response to strong seismic activity in the Far Eastern region combining the DEMETER and ground-based observations. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2015, Vol. 85–86, P. 141–149.

29. Fidani C., Battiston R., Burger W. J. A Study of the Correlation between Earthquakes and NOAA Satellite Energetic Particle Bursts. *Remote Sensing*. 2010, Vol. 2, P. 2170–2184.

30. Tao D., Battiston R., Vitale V., Burger W. J., Lazzizzera I., Cao O. and Shen X. A new method to study the time correlation between Van Allen Belt electrons and earthquakes. *International Journal of Remote Sensing*. 2016, Vol. 37, No. 22, P. 5304–5319.

31. Kaloshin I., Kuznetsov V., Skripachev V. and Surovceva I. Capabilities evaluation of spaceborne scientific equipment for geophysical applications. *MATEC Web of Conferences*. 2017, Vol. 102, No. 01024.

32. Blaunstein N., Plohotniuc E. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar, *CRC Press*. 2008, 600 p.

33. Peter W. B., Chevalier M. W., Inan U. S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms. *Journal of geophysical research*. 2006, Vol. 111, No. A03301.

© Калошин И. Б., Харламов А. Г., Скрипачев В. О., Суровцева И. В., Иванов В. К., 2017

UDC 629.78.051.062.2

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 876–881

THE ALGORITHM FOR ESTIMATING ANGULAR RATE OF SPACECRAFT IN SURVIVABILITY MODE

S. V. Latyntsev*, S. V. Meus, A. V. Ovchinnikov

JSC "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"
52, Lenina Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: lat.sv@mail.ru

The paper discusses the issue of ensuring survivability of Spacecraft (SC) in its long-term autonomous operation in space conditions for cases of critical failure of rate sensors. We presented an autonomous control loop in survivability mode in the form of a functional circuit and a mathematical model of control loop. On the spacecraft engineered by JSC ISS – Reshetnev, failures of an angular-rate sensor took place; these failures reduced a redundancy level and unfailing performance of SC; the failure of a standby angular rate sensor will lead to impossibility to use this mode. We came up with a solution to a problem of potential failures of angular rate sensors for spacecraft in operation in orbit using additional control logic; this solution is the purpose of our work. We developed a mathematical model of control without using an angular rate sensor. We described the model in details and it included estimating the angular rate according to previously generated control actions, calculation of control actions and filtration of evaluation registration according to measuring of a solar sensor. We showed the purpose of each newly introduced block that gives such advantages as improving the noise immunity of control loop to measurement errors, providing search rotation in the case of failure of all rate sensors. Improved control algorithm was synthesized. Having improved the basic algorithm, we carried out ground and flight tests. We performed mathematical modeling in the environment called GNU Octave.

Hybrid modeling was performed on rotary tables equipped with functional models of units and a functional model of onboard control subsystem. We conducted flight tests on real geostationary SC flying in orbit. For each test, we provided description of initial conditions and presented graphs of measurement of angular rate. We carried out all the tests successfully, and the algorithm is applied on the SC engineered by JSC "ISS – Reshetnev Company".

Keywords: pointing and attitude control system, spacecraft, angular rate, testing of pointing and attitude control system.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 876–881

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В РЕЖИМЕ ЖИВУЧЕСТИ

С. В. Латынцев*, С. В. Меус, А. В. Овчинников

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: lat.sv@mail.ru

Рассмотрен вопрос обеспечения живучести космического аппарата (КА) при его длительной автономной эксплуатации в условиях космического пространства для случаев критических отказов датчиков угловой скорости. Описан автономный контур управления в режиме живучести в виде функциональной схемы работы и математической модели управления. Приведен минимально необходимый приборный состав датчиковой аппаратуры ориентации для реализации режима, а именно, солнечный датчик и датчик угловой скорости. На КА разработки АО «ИСС» имели место отказы датчика угловой скорости, снизившие степень резервирования и надежность КА, выход из строя резервного датчика угловой скорости приведет к невозможности использования данного режима. Предложено одно из решений проблемы возможного отказа датчиков угловой скорости для уже летающих КА на орбите путем разработки дополнительного алгоритма управления, что и является целью статьи. Разработана математическая модель управления без использования показаний датчика угловой скорости. Эта модель подробно описана и включает в себя оценку угловой скорости по ранее выданным управляющим воздействиям, расчет управляющих воздействий и фильтрацию показаний оценки по измерениям солнечного датчика. Показано назначение каждого из вновь введенных блоков, которые дают такие преимущества, как повышение помехозащищённости контура к ошибкам измерений, обеспечение поискового вращения КА в случае отказа всех датчиков угловой скорости. Синтезирован улучшенный алгоритм управления. После доработки основного алгоритма были проведены наземные и летные испытания. Математическое моделирование производилось в среде GNU Octave. Полунатурное моделирование проводилось на поворотных

столах с установленными на них технологическими приборами ориентации и при использовании технологического вычислительного комплекса. Летные испытания проводились на реальном геостационарном КА, летающем на орбите. По каждому виду испытаний приведено описание начальных условий для тестов, приведены графики измерения угловой скорости. Все проведенные испытания окончились успешно, и данный алгоритм применяется на КА разработки АО «ИСС».

Ключевые слова: система ориентации и стабилизации, космический аппарат, угловая скорость, испытания системы ориентации и стабилизации.

Introduction. Spacecraft (SC) operation in orbit is connected to such an important concept as permanent performing of an object function. In the early going, the quality management system of SC is meant to provide SC runnability in case of equipment failure [1; 2]. For their part, the failures can be classified as: a) failures not having a considerable effect on performing an object function of SC and b) failures capable of leading to a temporary time gap in the operation of SC for the purpose intended [3]. The time gap can appear due to loss of orientation. For SC, engaged in communication session, in the areas of lack of communication, disorientation and electric battery discharge can cause disastrous effects, e.g. loss of spacecraft.

Survivability mode. To provide survivability of spacecraft during its continuous autonomous operation in conditions of outer space, JSC "ISS – Reshetnev" use autonomous control loop of vehicle orientation – survivability mode [4–6]. According to a patent, the idea of the mode involves automatic unfolding of a solar panel into a fixed position relative to a main body of spacecraft to make solar panels as enlightened by the Sun as possible. Consequently, spacecraft maintains positive power balance and it is saved. The flow chart of an autonomous control loop in survivability mode is shown in the fig. 1.

The operation algorithm consists of three blocks:

1) defining the angle of orientation of SC ($\Psi = [\psi\ \varphi\ \theta]$, ′), which is performed using a solar sensor (SS) [7]. In that mode, we used solar sensors that identify the sun position by means of two angles (φ and θ);

2) defining the angular rate of SC ($\Omega = [\omega_x\ \omega_y\ \omega_z]$, ′/s) it is performed using an angular-rate sensor or using the algorithm of angular rate calculation [8];

3) calculation and generation of control actions on SC [9].

The unit of evaluation and generation of control actions on SC exerts control by the laws [10]:

$$M = -K^a\Psi - K^D\Omega = \begin{bmatrix} -K_x^a\psi - K_x^d\omega_x \\ -K_y^a\varphi - K_y^d\omega_y \\ -K_z^a\theta - K_z^d\omega_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\tau = J / M \cdot \Delta t, \quad (2)$$

where $K^a = [\,K_x^a\ \ K_y^a\ \ K_z^a\,]$ is the coefficient of amplification, N·m·s/′; $K^d = [\,K_x^d\ \ K_y^d\ \ K_z^d\,]$ – damping coefficient, N·m·s^2/′; M – required control moment, N·m; τ – total time of generation of control signal, s; Δt – control period, s; J – momentum of inertia of SC, kg·m^2.

Using of orientation sensors (solar sensors and angular rate sensors), on-board digital computer system and jet orientation engines supports the survivability mode. Partial or complete failure of an angular rate sensor can cause a problem. Partial failure of an angular rate sensor occurred on the geostationary SC engineered by JSC "ISS – Reshetnev". Complete failure of an angular rate sensor would lead to disability of using survivability mode. An appropriate solution can be the algorithm of calculating angular rate on available orienting point – a star or the Sun, which is offered in [8]. However, using of these ways does not give the opportunity to provide search speed without orienting point in sight of a solar sensor.

We offered the solution in the form of a control algorithm taking into account failures of an angular rate sensor via one or more control channels with additional protection from short time false indications.

To define angular rate, we introduced an additional block, which calculates evaluation of angular rate according to the following formula:

$$\hat{\Omega}_i = \Omega_{i-1}^{op} + \Omega_{i-1}^{or.eng}, \quad (3)$$

where $\hat{\Omega}_i$ is the calculating values of angular rate at present, ′/s; Ω_{i-1}^{op} – control rate at a previous step, ′/s; $\Omega_{i-1}^{or.eng}$ – calculated value change of angular rate of SC according to generated control action speed at a previous step, ′/s. In survivability mode, ignition of an orientation engine provides control input according to the formula:

$$\Omega_{i-1}^{or.eng} = \tau_{i-1} \cdot p \cdot l / J, \quad (4)$$

where τ_{i-1} is the time of orientation engine ignition, s; p – rated thrust of an orientation engine, H; l – the arm of an orientation engine action, m; J – momentum of inertia of SC, kg·m^2.

Using of computer model of orientation engine ignition allows calculating the angular rate of SC that provides the system with parameters for controllability. The inaccuracy of angular rate depends on the accuracy of computer model of an orientation engine, as well as on initial value of angular rate. Nevertheless, using of estimation of angular rate by generated action allows providing search rotation of SC in the case of failure of all angular rate sensors that measure angular rate of SC in direction of search rotation.

Using a filter of angular rate of SC helps solve the task of protection from false indicated readings of ratemeter (levelling of impact) and compensation of inaccuracy of defining angular rate by the impact:

$$\hat{\Omega}_i^{op} = \hat{\Omega}_i + k\left(\Omega_i^{meas} - \hat{\Omega}_i\right), \quad (5)$$

where $\hat{\Omega}_i^{op}$ is control angular rate at present step, ′/s; Ω_i^{meas} – measured angular rate, ′/s; k – filter gain. The filter gain defines the convergence rate of rate estimation to measured rate, and it is chosen in the range from 0 to 1.

In fig. 2 we presented The flow chart of improved autonomous control loop in survivability mode.

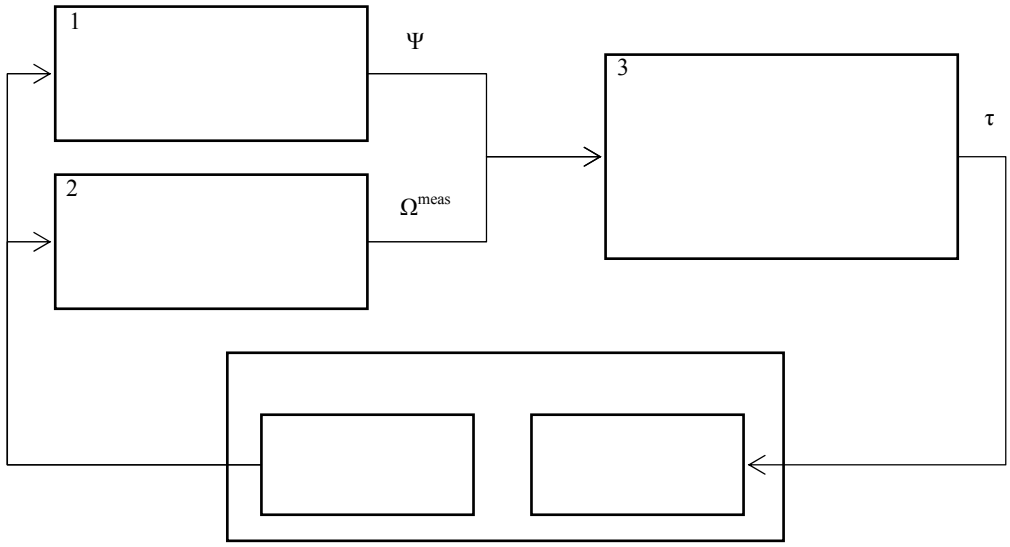


Fig. 1. Flow chart of an autonomous control loop in survivability mode

Рис. 1. Функциональная схема автономного контура управления в режиме живучести

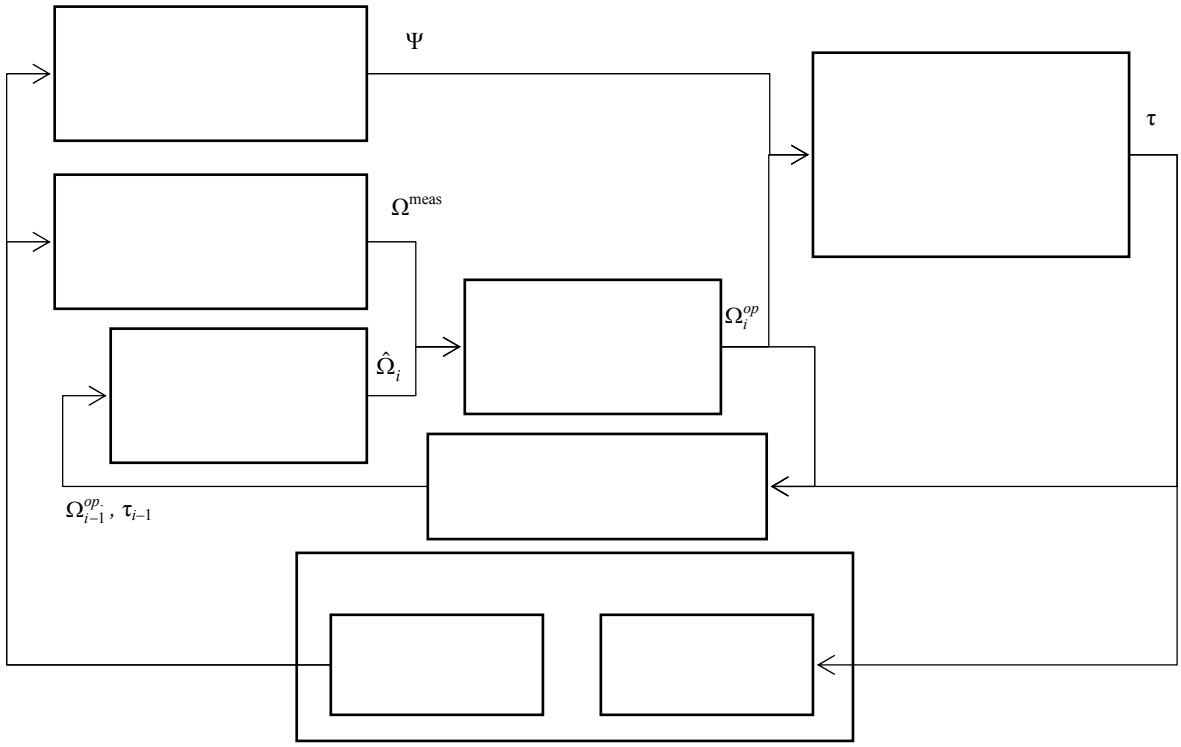


Fig. 2. Flow chart of improved autonomous control loop in survivability mode

Рис. 2. Функциональная схема усовершенствованного автономного контура управления в режиме живучести

Tests. For algorithm qualification, we used mathematical modeling in mathematical computation environment Octave GNU and in simulation ground-based debugging complex of onboard radioelectronics [11]. The mathematical model consisted of the following blocks: kinematic and dynamic model of SC [12]; device model; control system model [13]; model of orientation engine [14].

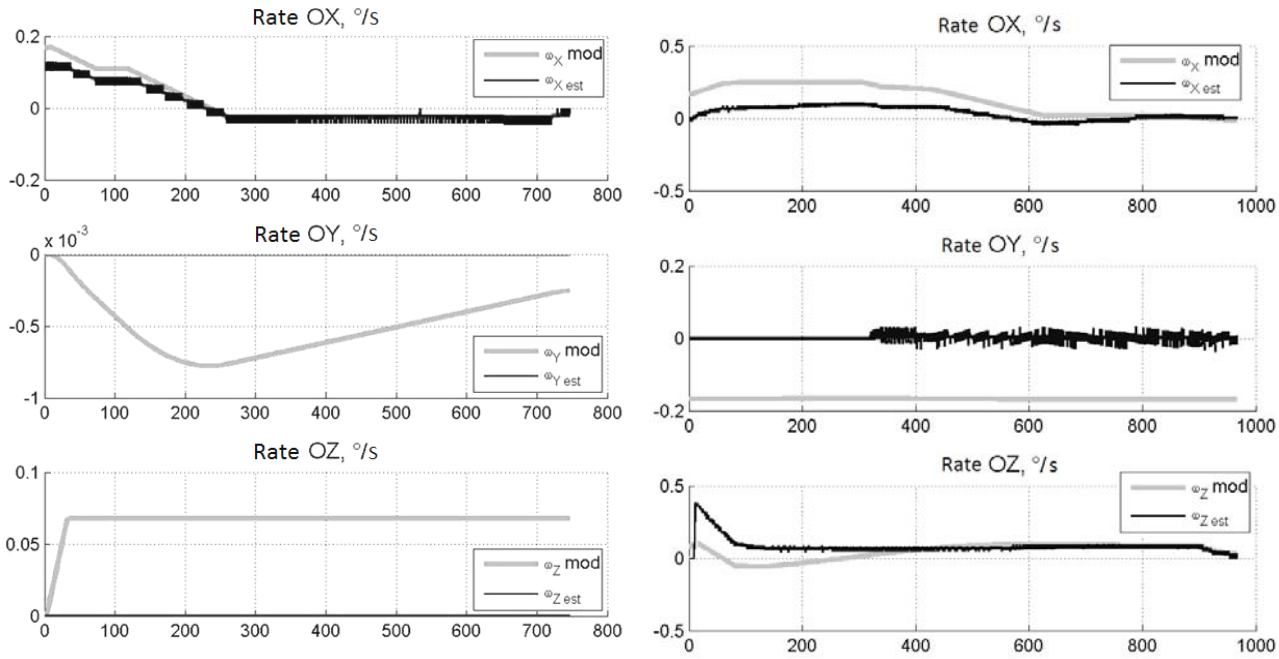
We simulated situations when at starting moment of time, angular rate in onboard software and model angular rate differed significantly (from –15 to 15 ′/s) for different

failures of angular rate sensors (8 failure combinations). We carried out more than 1000 test variations. Fig. 3 shows the results of two tests for two cases: *a* – failure of an angular rate sensor via channel *X*, *b* – failure of an angular rate sensor via all available channels. In the fig. 3 we labelled model angular rate of SC – $\omega_x$mod and angular rate estimation – $\omega_{x\ est}$.

Readings comparison of model angular rate and angular rate estimation shows ability to make required control actions via all control channels. We should focus on the situation of complete failure of an angular rate sensor and, consequently, lack of information about angular rate of SC. In this variant of failure, the algorithm of angular rate estimation solves the task of defining angular rate. Angular rate decrease via roll channel is impossible in some modes; one of these situations is shown in fig. 3, *b*. Its analysis shows that angular rate via pitch channels and yaw channels are calculated with some inaccuracy that decreases over time. The initial rate via roll channel (unknown to the algorithm) is not decelerated but it does not get lower. The fact that orientation is performed by a roll axis to the Sun does not give a possibility to measure angular rate via a roll channel using this orienting point. As high reliability and maximum possible development of the algorithm are required, we performed additional checking on an "iron bird", which consisted of real technological devices of a solar sensor and an angular rate sensor installed on rotary tables. You can see the description of an "iron bird" and methods of testing in the sources [14; 15]. We presented the graphs of angular rate changing while "iron bird" testing in fig. 4.

We can describe the results of the ground processing as effective: the algorithm successfully passed all the tests in all variants for all possible combinations of failures of an angular-rate sensor at different stages of processing.

The final test of the algorithm was live testing carried out on real SC, i. e. we prepared the programme to take spacecraft off into survivability mode with the simulation of angular-rate sensor failures. We carried out the four tests successfully. The logic of survivability mode with the improved algorithm effectively dealt with the orientation of SC on the Sun in the context of simulated failures of an angular rate sensor. Graphs of angular rate changing at verification tests in situ are shown in fig. 5.



a *b*

Fig. 3. Results of ground-based modeling tests with (*a*) failure of an angular rate sensor via channel *X*; failure of an angular rate sensor via all available channels (*b*)

Рис. 3. Результаты испытаний при наземном моделировании при отказе только ДУС по каналу *X* (*а*), и отказе ДУС по всем каналам управления (*б*)

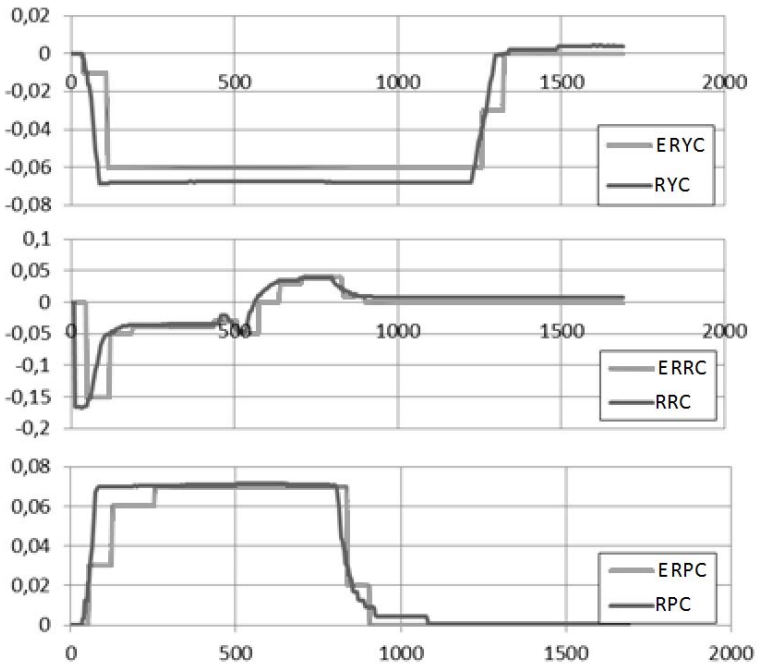


Fig. 4. Graphs of angular rate changing while “iron bird” testing

Рис. 4. Графики изменения угловой скорости при полунатурных испытаниях

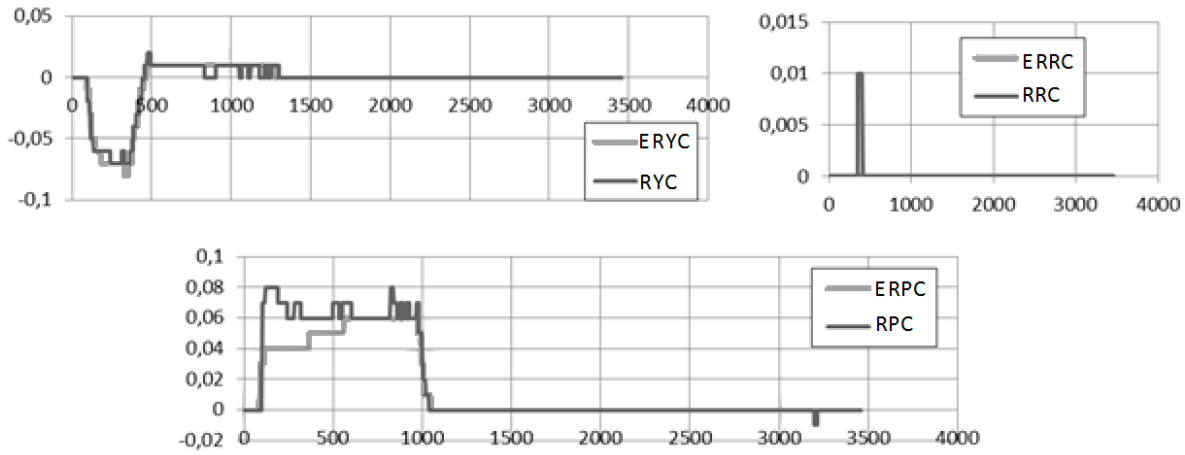


Fig. 5. Graphs of angular rate changing at verification tests in situ

Рис. 5. Графики изменения угловой скорости при натурных испытаниях

Conclusion. As a result of the research performed, the introduced method of algorithm improvement allows counteracting eventual failures of angular-rate sensors and ensuring protection from short time false indications; it was proved by the results of ground processing, “iron bird” tests and flight tests.

The improved algorithm is effectively applied on the geostationary SC developed by the JSC ISS – Reshetnev.

However, the algorithm has some drawbacks. One of them is impossibility to define a full vector of angular rate. Another variant of failures may be the failure of a solar sensor. We did not consider it in the paper, but it is rather important. In this case, the appropriate solution to the problem can be orientation in the current from solar panels.

References

1. GOST R 27.001–2009. *Nadezhnost’ v tekhnike. Sistema upravleniya nadezhnost’yu. Osnovnye polozheniya* [Reliability in engineering. Reliability management system. Fundamental principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 12 p.

2. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of the design of space vehicles for information support]. 2010, Krasnoyarsk, Sib. gos. aerokosm. un-t Publ., 488 p.

3. Patraev V. E. *Metody obespecheniya i otsenki nadezhnosti apparatov s dlitel’nym srokom aktivnogo sushchestvovaniya. Monografiya* [Methods of providing

and evaluating the reliability of devices with a long life span. Monograph]. 2010, Krasnoyarsk, Sib. gos. aerokosm. un-t Publ., 136 p.

4. Korotkih V. V., Nesterishin M. V., Open'ko S. I., Ovchinnikov A. V., Tentilov Ju. A., Jakimov E. N. *Sposob orientacii iskusstvennogo sputnika Zemli* [Method of orientation of an artificial earth satellite]. Patent RF, No. 2544021, 2015.

5. Open'ko S. I., Andreev A. V., Tjunjagin D. V. et al. [On-Board control system in small spacecraft]. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy.* 2015, P. 279–284 (In Russ.).

6. Pichkalev A. V., Grebennikov A. V. The Instrument of measuring angular rate and spatial position of SC for RASO]. *Sovremennye problemy radioelektroniki: sb. nauch. tr.* 2017, P. 303–305 (In Russ.).

7. Fedoseev V. I., Kolosov M. P. *Optiko-elektronnye pribory orientacii I navigacii kosmicheskih aparatov* [Optoelectronic devices of orientation and navigation of spacecraft]. 2007, Moscow, Logos Publ., 248 p.

8. Demchenko A. N., Sokolov M. B., Pozdeev O. V., Sokolov V. N., Kravchuk S. V. *Sposob opredeleniya vektora uglovoy skorosti sobstvennogo vrashcheniya kosmicheskogo apparata vokrug ego tsentra mass* [Method to determine an angular rate vector of self-rotation of spacecraft around its center of gravity]. Patent RF, No. 2396188, 2010.

9. Branec V. N., Sevast'janov N. N., Fedulov R. V. *Lekcii po teorii system orientacii, upravlenija dvizheniem i navigacii* [Lectures on the theory of orientation systems, traffic control and navigation: study guide]. 2013, Tomsk, Tomskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 313 p.

10. Kim D. P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. V 2 t. T. 1. Lineynye sistemy* [Theory of automatic control. Vol. 1. Linear systems]. 2003, Moscow, Fizmatlit Publ., 288 p.

11. Legan Ju. N. Pichkalev A. V., Prudkov V. V. [Modeling ground debugging complex of on-board radio-electronic equipment]. *Reshetnevskie chteniya.* 2016, P. 339–341 (In Russ.).

12. Raushenbah B. V., Tokar' E. N. *Upravlenie orientatsiey kosmicheskikh apparatov* [Controlling orientation of spacecraft]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 600 p.

13. Vasil'ev V. N. *Sistemy orientacii kosmicheskih apparatov* [Systems of orientation of spacecraft]. Moscow, NPP VNIIEM Publ., 2009, 310 p.

14. Sinickij D. E., Murygin A. V. [Simulation of the work of the propulsion system of spacecraft during ground tests]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf.* Krasnoyarsk, 2013, P. 334–335 (In Russ.).

15. Sinickij D. E., Fedchenko D. A., Murygin A. V. [Use of the method of dynamic in-line simulation for testing the system of orientation and stabilization of spacecraft]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki.* 2012, No. 8, P. 43–44 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 27.001–2009. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения. М., 2009. 12 с.

2. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

3. Патраев В. Е. Методы обеспечения и оценки надежности аппаратов с длительным сроком активного существования : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. 136 с.

4. Пат. 2544021 Российская Федерация, МПК[7] B 64 G 1/24, B 64 G 1/44. Способ ориентации искусственного спутника Земли / Коротких В. В., Нестеришин М. В., Опенько С. И., Овчинников А. В., Тентилов Ю. А., Якимов Е. Н. № 2013108292/11 ; заявл. 25.02.13 ; опубл. 10.03.15, Бюл. № 7. 7 с.

5. Бортовой комплекс управления в малых космических аппаратах / С. И. Опенько [и др.] // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований. 2015. С. 279–284.

6. Пичкалев А. В., Гребенников А. В. Аппаратура измерения угловых скоростей и пространственного положения КА для РАСО // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. 2017. С. 303–305.

7. Федосеев В. И., Колосов М. П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических апаратов : учеб. пособие. М. : Логос, 2007. 248 с.

8. Пат. 2396188 Российская Федерация, МПК[7] B 64 G 1/28 B 64 G 1/24. Способ определения вектора угловой скорости собственного вращения космического аппарата вокруг его центра масс / Демченко А. Н., Соколов М. Б., Поздеев О. В., Соколов В. Н., Кравчук С. В. № 2009109602/11 ; заявл. 18.03.2009 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22. 7 с.

9. Бранец В. Н., Севастьянов Н. Н., Федулов Р. В. Лекции по теории систем ориентации, управления движением и навигации : учеб. пособие. Томск : Томский гос. ун-т, 2013. 313 с.

10. Ким Д. П. Теория автоматического управления. В 2 т. Т. 1. Линейные системы. М. : Физматлит, 2003. 288 с.

11. Леган Ю. Н. Пичкалев А. В., Прудков В. В. Моделирующий наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 339–341.

12. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М. : Наука, 1974. 600 с.

13. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов. М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. 310 с.

14. Синицкий Д. Е., Мурыгин А. В. Имитация работы двигательной установки космического аппарата при наземных испытаниях // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 334–335.

15. Синицкий Д. Е., Федченко Д. А., Мурыгин А. В. Использование метода полунатурного динамического моделирования для испытания системы ориентации и стабилизации КА // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. № 8. С. 43–44.

© Latyntsev S. V., Meus S. V., Ovchinnikov A. V., 2017

UDC 629.785

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 882–887

STRESS ANALYSIS OF SOLAR ARRAY DRIVER MECHANISM ACTUATOR OF THE SPACECRAFT "LUNA-RESURS-1"

E. V. Tambasova[1, 2*], A. V. Tokarev[2], S. V. Pavelko[2], I. A. Tambasov[3]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
[3]Kirensky Institute of Phisics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
50, Akademgorodok Str., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: K_Yozh@mail.ru

The intrrest of spacefaring nations in the Moon has grown considerably in recent years. Russia, China, the European Space Agency, the USA and some other countries have the Lunar programs. The movement around the Moon has a number of the features caused by gravitational field of the Moon, mascons and the small period of rotation. Therefore these features need to be considerd at the design of both the space vehicle and its components. The electromechanical block of solar array drive mechanism (SADM) of the spacecraft "Luna-Resurs-1" for a remote research of the Moon is presented. It serves for rotation of solar batteries panels and provides orientation of the panels by active part to the Sun. The purpose of this work is the analysis of strength characteristics of the spacecraft electromechanical block of SADM in the research of the Moon. Stress analysis of the basic power elements of the design by method of final elements in the Static analysis application of a CATIA package is made. The results of the calculation confirm the lifting power of a load-carrying structure. The minimum margin of safety of the most loaded detail is equal to 1.91. The developed device considers all the features of the movement on an orbit of the Moon and can be used in the research spacecrafts when studying a terrain and structure of the Lunar surface.

Keywords: stress analysis, Moon exploration, solar panels, mechanical devices, satellite "Luna-Resurs-1".

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 882–887

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО БЛОКА УСТРОЙСТВА ПОВОРОТА БАТАРЕЙ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЛУНА-РЕСУРС-1»

Е. В. Тамбасова[1, 2*], А. В. Токарев[2], С. В. Павелко[2], И. А. Тамбасов[3]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[3]Институт физики им. Л. В. Киренского Красноярского научного центра СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50
[*]E-mail: K_Yozh@mail.ru

Интерес космических держав к Луне в последние годы значительно вырос. Россия, Китай, европейские государства, США и ряд других стран имеют свои лунные программы. Движение вокруг Луны имеет ряд особенностей, вызванных гравитационным полем Луны, масконами и малым периодом вращения. Поэтому при проектировании космического аппарата (КА) в целом и его составных частей данные особенности необходимо учитывать. Представлен электромеханический блок (ЭМБ) устройства поворота батарей солнечных (УПБС) космического аппарата «Луна-Ресурс-1» для дистанционного исследования Луны. Он служит для вращения панелей батарей солнечных, обеспечивая ориентацию панелей активной стороной на Солнце. Целью статьи является анализ прочностных характеристик ЭМБ УПБС космического аппарата по исследованию Луны. Конструкция блока была оптимизирована. Произведен прочностной расчет основных силовых элементов конструкции методом конечных элементов в приложении Static Analysis пакета CATIA. Результаты расчета подтверждают несущую способность силовой конструкции. Минимальный запас прочности наиболее нагруженной детали равен 1.91. Разработанный электромеханический блок устройства поворота батарей солнечных учитывает все особенности движения по орбите Луны и может применяться на научно-исследовательских КА по изучению рельефа и состава лунной поверхности.

Ключевые слова: расчет на прочность, исследование Луны, батареи солнечные, механические устройства, космический аппарат «Луна-Ресурс-1».

Introduction. The leading spacefaring nations of the world, such as Russia, the United States, China, Japan, India, as well as the European Space Agency (ESA) are interested in the Moon. The interest concerns the analysis of the mineralogical composition of the moon, the extraction of expensive rare earth elements and isotopes, such as gallium and helium-3 [1; 2]. A number of programs have already been implemented, and some are only being planned for implementation. So in 2003 ESA launched SMART-1, which carried out the tasks of exploring and detecting potential lunar resources, solving problems related to the theories of the origin of the Moon, and analyzing the composition of the Moon's surface [3; 4]. In 2007 the Japanese satellite SELENE, which dealt with the origin of the Moon and studied the mineralogical composition of its surface, was launched [5; 6]. The Indian satellite Chandrayaan-1 [7; 8], the Chinese - Chang'e 1,2,3 were engaged in the solution of the problems mentioned above, in addition, in the next few years it is planned to launch spacecrafts Chang'e 5,6, providing the possibility of sampling and delivery of lunar soil to the Earth [9].

The space program approved by Roskosmos for 2016–2025 includes the project "Moon-Globe", which implies the use of the spacecraft "Luna-Resurs-1" intended for remote exploration of the Moon [10]. The device will solve the following tasks: mapping the mineralogical composition of the Moon, mapping the distribution of water ice on the lunar surface, studying the structure of the subsurface layers, and topography of the lunar surface. The working orbit is a circular polar lunar orbit with an altitude of 150 km and an altitude of about 100 km. The launch date is 2020 [11].

Orbital movement around the moon has a number of specific features. The force of the gravitational field of the Moon exceeds the Earth's gravity by 5–6 times [12]. In addition, the gravitational field of the moon contains many anomalies caused by the mascons [13; 14]. The Mascon is a region of the Moon's lithosphere, consisting of a significant mass accumulation. Therefore, when designing the spacecraft "Luna-Resurs-1" and its components, it is necessary to take into account the particular features of the motion along the Moon's orbit. In addition, launching a spacecraft into the Moon's orbit is much more expensive than launching a spacecraft into Earth's orbit, so the mass of composite units and spacecraft devices should be minimal.

The description of the electromechanical block of the solar array drive mechanism (EMB of SADM). EMB of SADM is a device designed to solve the following problems [15]:

– rotation of solar arrays for the purpose of their orientation to the Sun;

– for transit transmission of electricity from solar array drive mechanism to spacecraft;

– giving information on the position of the output shaft of EMB of SADM;

– transit transmission of control signals to the drive for expanding the solar array (SA) panels.

EMB of SADM of the spacecraft "Luna-Resurs-1" (fig. 1) consists of a drive, angular position sensors, a power collector device, a telemetric current collector device.

One of the main conditions for maintaining the efficiency of EMB of SADM is its mechanical strength. At the initial stages EMB of SADM design, the estimation of the bearing capacity is carried out by numerical simulation methods, which results in decisions on structural modification, if necessary.

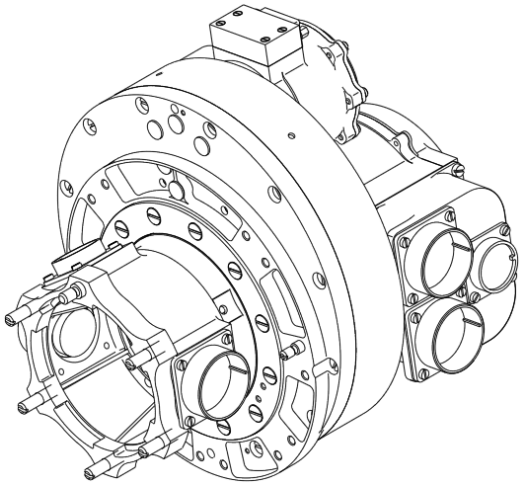


Fig. 1. Physical configuration of EMB of SADM

Рис. 1. Внешний вид ЭМБ УПБС

Static stress analysis of the main power elements of EMB of SADM. Loads acting on the electromechanical block of SADM, perceive the main load carrying elements of the structure (fig. 2).

An output flange was added into the power circuit of EMB of SADM of the spacecraft "Luna-Resurs-1". This is done to increase the load-bearing capacity of the EMB and to distribute the mechanical stresses more evenly. The design of the EMB of SADM elements for the output flange, the output shaft, the board and the case was elaborated in detail. The optimal geometric dimensions of the stiffeners and wall thicknesses were chosen in such a way that the bearing capacity was maximum and the mass minimal. Thus, the stiffeners were added to the construction of the "Output Flange" component.

The EMB must satisfy the strength conditions and remain operative after exposure to loads aroused in the insertion phase and in the area where the solar arrays are deployed into the working position (orientation to the sun). Therefore, three simulation cases were considered. Case № 1 simulates static loads that occur during the stage of the launch of Luna-Resurs-1 spacecraft into the Moon's orbit, when the solar cells are in a fold position. Simulation cases № 2 and № 3 imitate the loads that occur when the solar arrays are deployed into the working position (orientation to the Sun).

Fig. 3 shows the scheme for fixing the EMB of SADM. The load that occurs when the solar arrays are deployed is transferred from the output flange to the shaft. Then the force is transferred from the drive shaft through the bearing part to the board, which is attached directly to the spacecraft. The case, the cover, the flange are in the structural diagram additional elements that increase the rigidity.

The output flange, case, board, flange, connector and cover are made of aluminum alloys. The output shaft, gear wheel, clamping ring are made of titanium alloy. Stress analysis was performed on the basis of equivalent stresses. As the working stress for all structural elements, the yield stress σ_m is chosen so as to avoid the appearance of permanent deformations. The safety margin was determined by the formula:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{экв}} \geq 1 , \qquad (1)$$

where σ_m is the yield stress, MPa; $\sigma_{экв}$ is maximum stress arising in the construction, MPa.

The calculation was carried out for all the elements of the structure diagram by the finite element method in the CATIA Static Analysis application. The grid is created on the basis of tetrahedral finite elements with a linear size of 3 mm. The model is developed taking into account the possibility of its use for thermal analysis. In the places where the parts were fastened, absolutely rigid elements of RIGID were introduced, the boundary conditions and loads were imposed on these elements. In order to organize the transfer of load from the output shaft to the board and case, the bearing part was imitated in the simulation scheme.

The design model has been verified to eliminate the appearance of degenerate elements and impairment stresses. The influence of input data on the response of the design model is analyzed. The results of the calculation are presented only for two details: the output flange (fig. 4) and the output shaft (fig. 5), since they are the most loaded.

Table shows the values of equivalent stresses, yield stresses and safety margins of the parts, the output flange and the output shaft, which arise under the action of loads.

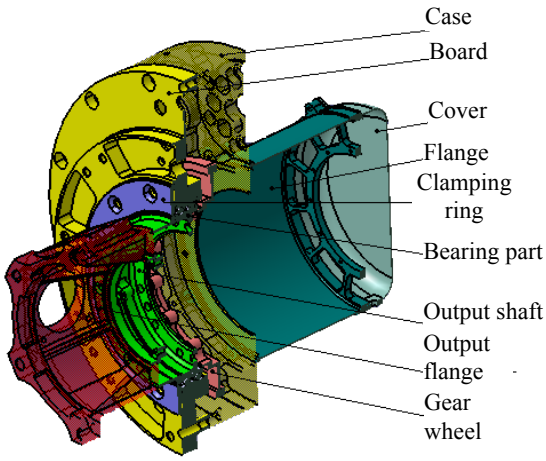


Fig. 2. Structure diagram of EMB of SADM (section in an isometric projection)

Рис. 2. Силовая схема ЭМБ УПБС (разрез в изометрической проекции)

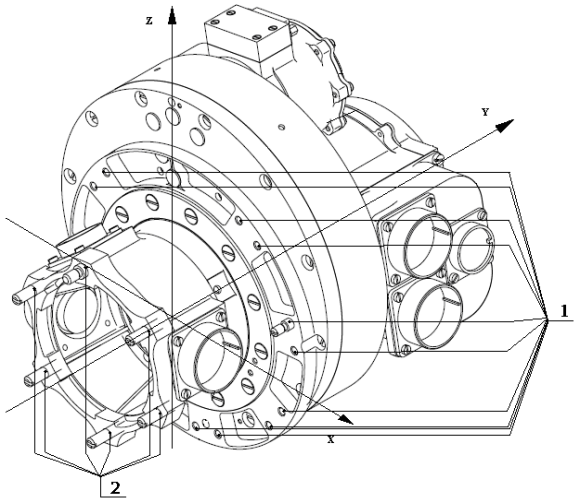
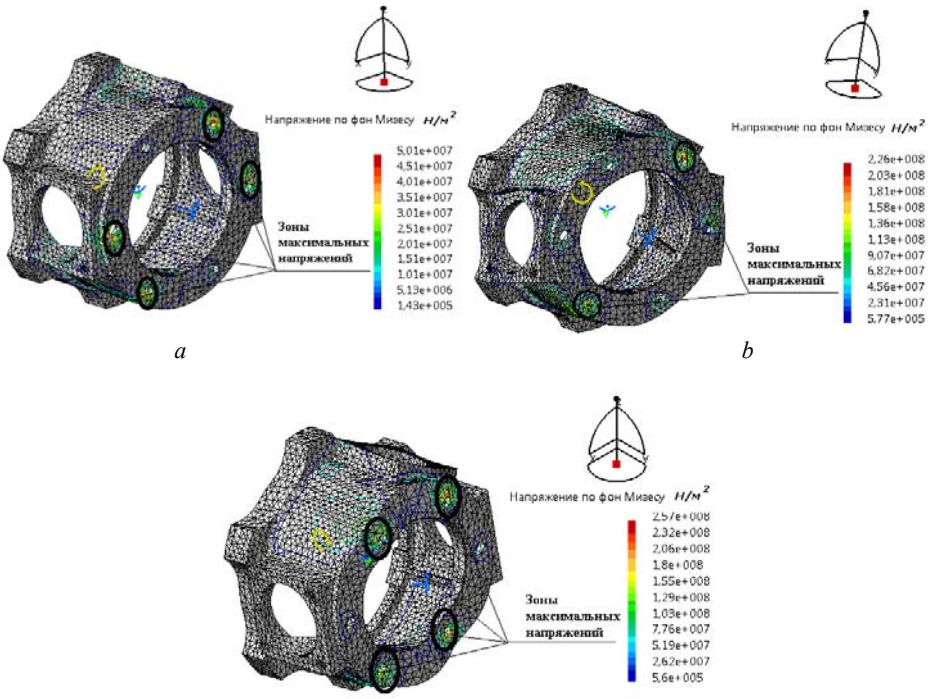


Fig. 3. Scheme of fixing EMB of SADM: 1 – places of fastening EMB of SADM to the spacecraft; 2 – places of fastening of a bar of the solar array with the electromechanical block of SADM

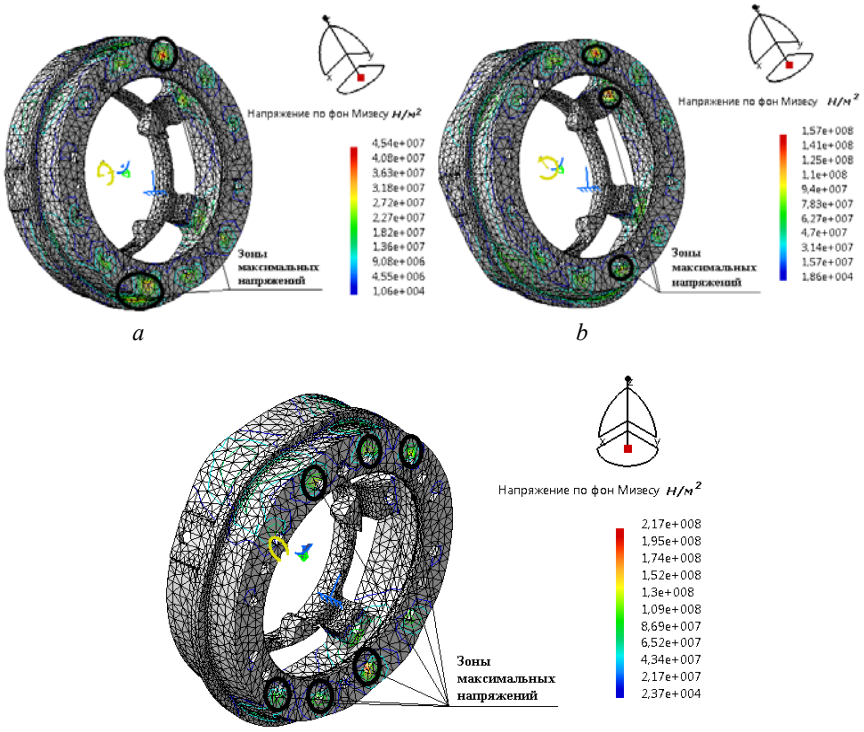
Рис. 3. Схема закрепления ЭМБ УПБС: 1 – места крепления ЭМБ УПБС к КА; 2 – места крепления штанги солнечной батареи с ЭМБ УПБС



a *b* *c*

Fig. 4. Tensely deformed condition of an output flange:
a – case of loading № 1; *b* – case of loading № 2; *c* – case of loading № 3

Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние фланца выходного:
а – случай нагружения № 1; *б* – случай нагружения № 2; *в* – случай нагружения № 3



a *b* *c*

Fig. 5. Tensely deformed condition of an output shaft:
a – case of loading № 1; *b* – case of loading № 2; *c* – case of loading № 3

Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние вала выходного:
а – случай нагружения № 1; *б* – случай нагружения № 2; *в* – случай нагружения № 3

The results of statistic stress analysis of the output flange and the output shaft

№ Load case	The element of the design	Maximum stress $\sigma_{экв}$, MPa	Yield stress $\sigma_т$, MPa	Safty margin η
1	The output flange	50.1	490	9.78
	The output shaft	45.4	750	16.52
2	The output flange	226	490	2.17
	The output shaft	157	750	4.78
3	The output flange	257	490	1.91
	The output shaft	217	750	3.46

Conclusion. The output flange is added to the structure diagram of EMB of SADM of the spacecraft "Luna-Resurs-1" to increase its lifting power and for a more even load distribution. Optimization of the design of EMB of SADM was carried out, and as a result the mass of the node was reduced by 4.37 %. Stress analysis calculation of the main force elements is made. The electromechanical unit withstands specified loads with a safety margin of at least 1.91.

The work was financially supported by RFBR (grant No. 16-32-00302 mol_a), RFBR and the Government of the Krasnoyarsk Territory within the framework of the scientific project No. 16-42-243059 r_mol_a and № 16-42-240602 r_a, the programs of the Foundation for Assistance to Development of small forms of enterprises in the scientific and technical sphere ("UMNIK" Contract No. 6662UG2015 and No. 9607GU2015), scholarship of the President of the Russian Federation SP-317.2015.1.

References

1. *MOON. FACTS. Lunar elementals*. Available at: http://sci.esa.int/smart-1/31412-moon/ (accessed 15.03.2017).

2. Fa Wenzhe, Jin Ya-Qiu, Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer. *Icarus*. 2007, Vol. 190, No. 1, P. 15–23.

3. *SMART-1*. Available at: http://sci.esa.int/smart-1/ (accessed 18.03.2017).

4. Foing B. H., Racca G. D., Marini A., Heather D. J., Koschny D., Grande M., Huovelin J., Keller H. U., Nathues A., Josset J. L., Malkki A., Schmidt W., Noci G., Birkl R., Sodnik L. Iess., McManamon P., SMART-1 mission to the moon: technology and science goals. *Adv. Space Res.* 2003, Vol. 31, No. 11, P. 2323–2333.

5. Sasaki S., Iijima Y., Tanaka K., Kato M., Hashimoto M., Mizutani H., Takizawa Y. The SELENE mission: goals and status. *Adv. Space Res.* 2003, Vol. 31, No. 11, P. 2335–2340.

6. Kato M., Sasaki S., Tanaka K., Iijima Y., Takizawa Y. The Japanese lunar mission SELENE: Science goals and present status. *Advances in Space Research*. 2008, Vol. 42, P. 294–300.

7. Goswami J. N., Annadurai M., Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the moon. *Current science*. 2009, Vol. 96, No 4, P. 486–491.

8. Pieters Carle M., Boardman J., Buratti B., Chatterjee A., Clark R., Glavich T., Green R., Head III J., Isaacson P., Malaret E., McCord T., Mustard J., Petro N., Runyon C., Staid M., Sunshine J., Taylor L., Tompkins S., Varanasi P., White M. The Moon mineralogy mapper on Chandrayaan-1. *Current science*. 2009, Vol. 96, No 4, P. 500–505.

9. *China national space administration.* Available at: http://www.cnsa.gov.cn/ (accessed 17.03.2017).

10. *State Space Corporation Roscosmos. Space program. Federal space program.* Available at: http://www.roscosmos.ru/22347/ (accessed 25.03.2017).

11. Spacecraft "Luna-Resurs-1" (OA). Available at: http://www.laspace.ru/projects/planets/luna-resurs-oa/ (accessed 04.03.2017).

12. Levantovskiy V. I., *Mehanika kosmicheskogo poleta v elementarnom izlozhenii* [Space flight mechanics in elementary exposition]. 1980, Nauka Publ., 512 p.

13. Iwata T., Matsumoto K., Hanada H., Noda H., Goossens S., Ogawa M., Kawano N., Asari K., Tsuruta S., Ishihara Y., Liu Q., Kikuchi F., Ishikawa T., Sasaki S., Aoshima C., Kurosawa K., Sugita S., Takano T. Farside Gravity Field of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya) Noriyuki Namiki. *Science*. 2009, Vol. 323, P. 900–905.

14. Konopliv A. S., Binder A. B., Hood L. L., Kucinskas A. B., Sjogren W. L., Williams J. G., Improved Gravity Field of the Moon from Lunar Prospector. *Scienc*e. 1998, Vol. 281, Iss. 5382, P. 1476–1480.

15. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovi proektirovania kosmicheskih apparatov informazionnogo obespechenia* [Bases of design of spacecrafts of information support]. Krasnoyarsk, SIBSAU Publ., 2011, 488 p.

Библиографические ссылки

1. MOON. FACTS. Lunar elementals [Электронный ресурс]. URL: http://sci.esa.int/smart-1/31412-moon/.

2. Wenzhe Fa, Ya-Qiu Jin. Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer // Icarus. 2007. Vol. 190, No. 1. P. 15–23.

3. SMART-1 [Электронный ресурс]. URL: http://sci.esa.int/smart-1/.

4. SMART-1 mission to the moon: technology and science goals / B. H. Foing [et al.] // Adv. Space Res. 2003. Vol. 31, No. 11. Pp. 2323–2333.

5. The SELENE mission: goals and status / S. Sasaki [et al.] // Adv. Space Res. 2003. Vol. 31, No. 11. Pp. 2335–2340.

6. The Japanese lunar mission SELENE: Science goals and present status / M. Kato [et al.] // Advances in Space Research. 2008. Vol. 42. Pp. 294–300.

7. Goswami J. N., Annadurai M., Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the moon // Current science. 2009. Vol. 96, No 4. Pp. 486–491.

8. The Moon mineralogy mapper on Chandrayaan-1 / M. Pieters Carle [et al.] // Current science. 2009. Vol. 96, no 4. Pp. 500–505.

9. China national space administration [Электронный ресурс]. URL: http://www.cnsa.gov.cn/.

10. Фундаментальные космические исследования [Электронный ресурс] / Федеральное космическое агентство. URL: http://www.federalspace.ru/116/.

11. Космический аппарат «Луна-Ресурс-1» [Электронный ресурс]. URL: http://www.laspace.ru/projects/planets/luna-resurs-oa/.

12. Левантовский В. И. Механика космического полета в элементарном изложении. 3-е изд., доп. и перераб. М. : Наука, 1980. 512 с.

13. Farside Gravity Field of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya) Noriyuki Namiki / T. Iwata [et al.] // Science. 2009. Vol. 323. Pp. 900–905.

14. Improved Gravity Field of the Moon from Lunar Prospector / A. S. Konopliv [et al.] // Science. 1998. Vol. 281, iss. 5382. Pp. 1476–1480.

15. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с. : ил.

© Tambasova E. V., Tokarev A. V.,
Pavelko S. V., Tambasov I. A., 2017

Раздел
Part
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS SCIENCE

УДК 504.054+ 630.11

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 890–896

МИКРОБИОЛОГИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ СОЕДИНЕНИЯМИ АЗОТА ПОЧВ

М. Е. Баранов[1*], Л. А. Герасимова[1], С. В. Хижняк[2], П. А. Дубынин[1], И. А. Клешнина[1]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Красноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90
[*]E-mail: pavel.dubynin@mail.ru

Антропогенное загрязнение почвы существенно нарушает механизм самоочищения и способствует скорейшей её деградации. В результате загрязнения в почве изменяется влажность, температура, нарушается режим аэрации. Существенные изменения происходят в видовом и качественном составе микроорганизмов, нарушается режим их жизнедеятельности, что очень негативно сказывается на процессах почвообразования и ее самоочищения. Наибольшую угрозу для почвы представляет химическое загрязнение. Объектом исследования являлись почвенный покров и его микробные сообщества на объекте хранения компонентов ракетного топлива (КРТ). После ликвидации воинской части в районе поселка Памяти 13 Борцов Емельяновского района Красноярского края из-за попадания в почву значительного количества КРТ сложилась неблагоприятная экологическая обстановка, что нашло своё отражение в сохранении высокого уровня фитотоксичности. В настоящее время бывшая ракетная база является бесхозной, имеются разрушенные спецсооружения. На почвенном покрове имеются видимые маслянистые пятна, присутствует специфический запах. Содержание КРТ в грунте составляет 0,001 мг/л, что соответствует уровню «Очень опасно» и «Опасно» по показаниям войскового прибора химической разведки (ВПХР). В связи с этим необходимо углубленно изучить предполагаемые места пролива КРТ для проведения работ по детоксикации почвенного покрова. Для проведения эксперимента было отобрано 13 проб из различных участков, расположенных на определенном расстоянии друг от друга и охватывающих зоны, приближенные к техническим сооружениям, а также одна проба на удалении трех километров от объекта исследования.

Целью исследования является проведение микробиологического анализа почвы и выявление наиболее загрязненных участков на исследуемом объекте. В связи с этим требуется углубленно изучить микробиологические показатели почвы как основного индикатора, определяющего уровень загрязнений; сравнить микробиологические показатели изучаемого участка до проведения рекультивации с почвенными микробными комплексами региона; провести статистическую обработку полученных экспериментальных данных для минимизации площади, подлежащей рекультивации.

Ключевые слова: почва, химическое загрязнение, компоненты ракетного топлива, микробиологический анализ.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 890–896

MICROBIOLOGY CONTAMINATED WITH NITROGEN COMPOUNDS OF SOILS

M. E. Baranov[1*], L. A. Gerasimova[1], S. V. Khizhnyak[2], P. A. Dubynin[1], I. A. Kleshnina[1]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian State Agrarian University
90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
[*]E-mail: pavel.dubynin@mail.ru

Anthropogenic pollution of soil greatly disturbs the self-cleaning mechanism and assists in its degradation. As a result of contamination in the soil changes the humidity, temperature, impaired aeration mode. Significant changes occur in the species and qualitative composition of microorganisms, the mode of life is disrupted that has a negative effect on the processes of soil formation and self-purification. The greatest threat to the soil is chemical pollution. The object of the study was the soil and its microbial community at the storage facility KRT (rocket fuel). After the liquidation of the military unit near the settlement of pamyati 13 Bortsov, Emelyanovsky district, Krasnoyarsk region due to contact with soil significant amount of KRT was unfavorable ecological situation that has reflected in maintaining a high level of phytotoxicity. Nowadays the former missile base is unattended, special structures are destroyed. In the soil cover there is visible oily spots, a peculiar smell. The contents of KRT in soil is 0.001 mg/l, which corresponds to the level of "Danger" according to the testimony of the army device of chemical investigation (VPHR).

In this connection it is necessary to study in depth the places of the Strait of KRT for the work on detoxification of soil cover. For the experiment, we selected 13 samples from different sites located at a certain distance from each other and covering the area close to technical facilities, as well as one sample for the removal of three kilometers from the object of study.

The aim of the study is to conduct a microbiological analysis of soil and identify the most polluted areas on the object. In this connection, you need to study the microbiological parameters of soil as the main indicator defining the level of pollution. It is necessary to compare the microbiological characteristics of the study area prior to reclamation of soil microbial complexes in the region. To carry out statistical processing of the obtained experimental data to minimize the area subject to reclamation.

Keywords: soil, chemical pollution, rocket fuel components, microbiological analysis.

Введение. Эксплуатация ракетной техники является многофункциональным и сложным процессом, связанным с использованием химически опасных веществ и материалов [1].

В настоящее время на фазе предстартовой подготовки ракет разработаны эффективные мероприятия, позволяющие существенно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду [2]. Например, процессы нейтрализации паров и жидкой фазы окислителя с помощью поглотителей, дожигание горючего в специальных аппаратах и т. д. Несмотря на это, в процессе ликвидации военных объектов неоднократно могли происходить аварии [3]. Серьезной экологической проблемой является слив из ракет и специальных емкостей несимметричного диметилгидразина (НДМГ) и азотной кислоты (АК) при выводе их из эксплуатации. Извлечение всего объема топлива и окислителя – технологически сложный и опасный процесс [4]. В связи с этим возникает необходимость проведения экологических исследований в области воздействия объектов ракетно-космической техники (РКТ) на природную среду, которые могли бы дать объективную информацию о масштабах и интенсивности этого воздействия [5]. Одним из факторов такого воздействия является попадание в почву окислителя – тетраоксида азота [6].

На сегодняшний день существует множество способов определения химического загрязнения почвы [7]. Самым распространенным и универсальным по праву считается метод биотестирования [8]. Большинство животных, растений, микроорганизмов однозначно реагируют на наличие загрязнения в окружающей их среде [9]. Для определения загрязненности почвенного покрова можно использовать бактерии, находящиеся в нем [10].

Микробиологические показатели почвы являются основными индикаторами уровня загрязнения. Приняв за показатель загрязненности грунта количество колоний, можно судить о наличии отсутствия антропогенного загрязнения в почвенном покрове.

Целью исследования является проведение микробиологического анализа почвы и выявление загрязненных участков на исследуемом объекте, определение зон для последующей рекультивации.

Объект и методы исследований. Объектом исследования является почвенный покров и его микробные сообщества на территории хранилища КРТ, расположенного на бывшем месте дислокации воинской части в районе поселка Кедровый Емельяновского района Красноярского края (рис. 1).

Летом 2017 года на исследуемом объекте было выбрано 13 пробных площадок размером 2×2 м [11]. Площадки выбирались с учетом видимых проливов на поверхности почвы вблизи технических сооружений. Для контроля выбрана площадка на удалении трех километров от исследуемого объекта. Точечные пробы отбирали на пробных площадках из слоя 0–20 см методом конверта (рис. 2).

Рис. 1. Хранилище окислителя (фото авторов)

Fig. 1. Fuel storage (photo of the authors)

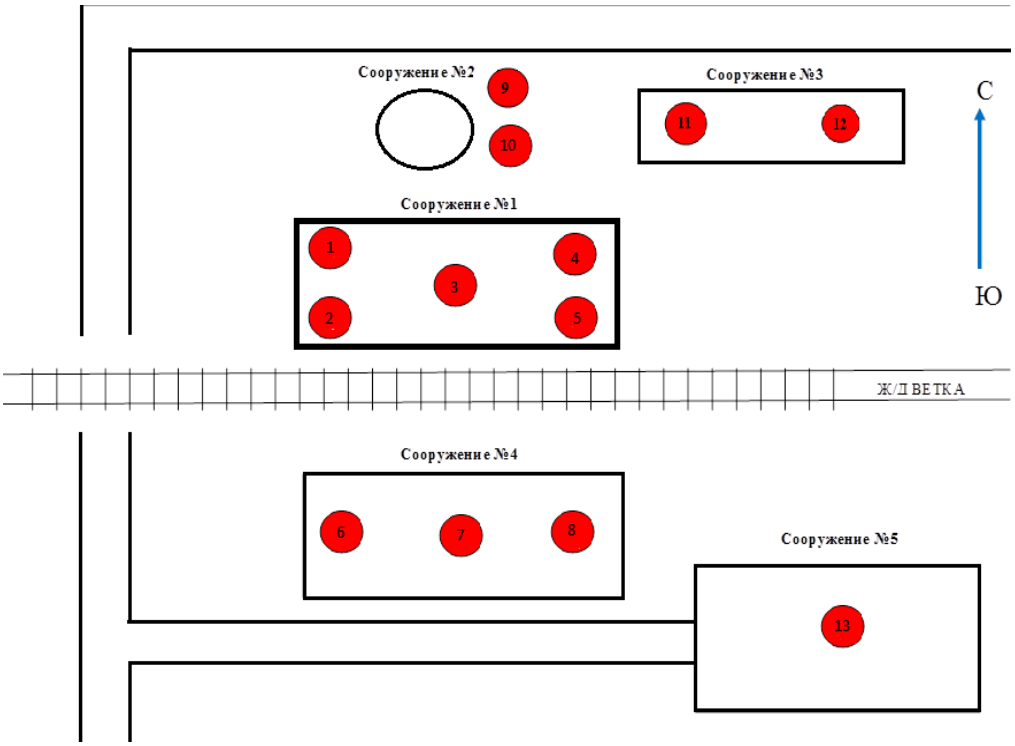


Рис. 2. Схема зоны хранения КРТ (цифрами обозначены точки отбора проб)

Fig. 2. Diagram of storage areas of KRT (the numbers marked by the sampling points)

Объединенные пробы составили путем смешивания 5 точечных проб, отобранных на одной пробной площадке. Наличие химических опасных веществ в почве определяли с помощью ВПХР. Для выявления уровня загрязнения использовали индикаторные трубки «ИТ-Г1», «ИТ-АК». В лабораторных условиях определяли численность микроорганизмов различных эколого-трофических групп [12]. Выделение микроорганизмов проводили стандартными методами рассева на поверхность агаризованной питательной среды [13]. В качестве питательных сред использовали следующие среды: для выделения аммонифицирующих бактерий – ПД-агар (пептон ферментативный, сухой для бактериологических целей – 9,0 гл, гидролизат казеина ферментативный, неглубокой степени расщепления – 8,0 гл, дрожжевой экстракт – 3,0 гл, хлорид натрия – 5,0 гл, натрий гидроортофосфат – 2,0 гл, агар микробиологический – 20 гл, pH = 7,0–7,2); для выделения гетеротрофных бактерий, усваивающих минеральный азот, – модифицированную среду Чапека (глюкоза – 20,0 гл, NH_4NO_3 – 2,0 гл, KH_2PO_4 – 0,5 гл, $MgSO_4*7H_2O$ – 0,5 гл, KCl – 0,5 гл, $FeSO_4$ * $7H_2O$ – 0,01 гл, агар микробиологический – 20,0 гл, вода – 1000 мл, pH = 7,0–7,2); для выделения олиготрофных бактерий – среду для выделения олиготрофов (50 мл ПД-агара + 50 мл модифицированной среды Чапека на 1 л среды). Численность микроорганизмов определяли стандартным методом высева из серийных разведений суспензии на поверхность питательного агара [14; 15]. Численность выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ) на вес сухой почвы. Математическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием пакета анализа MS Excel и StatSoft STATISTICA 6.0 [16].

Результаты исследования. По результатам исследований на изучаемой территории выделены два участка: участок № 1 слива и хранения КРТ и участок № 2 нейтрализации и очистки стоков.

На участке № 1 расположены сооружения № 1 «Хранилище НДМГ» и сооружение № 2 «Хранилище азотной кислоты», в сооружениях расположены емкости и сливно-наливные устройства. На участке № 2 расположены сооружение № 2 «Станция очистки», сооружение № 3 «Специальная лаборатория», сооружение № 5 «Станция нейтрализации». В ходе ликвидации базы хранения КРТ при сливно-наливных операциях и нейтрализации технических средств хранения, перекачки и транспортирования произошли технологические проливы топлива. На участке № 1 присутствует резкий неприятный запах, имеются видимые маслянистые пятна на поверхности почвы, которые свидетельствуют о химическом загрязнении почвы. В ходе естественной миграции последствия пролива КРТ ярко выражены вблизи сооружений № 1, 4.

По результатам проведённых анализов микробиологические показатели почвы изученной территории варьировали в широких пределах. Численность бактерий изучаемых эколого-трофических групп и размах варьирования этих численностей превышал аналогичные показатели для почв региона по данным А. В. Богородской и О. А. Сорокиной (табл. 1).

Так, в почвенных образцах, взятых с участка № 1, преобладают бактерии, усваивающие минеральный азот, их количесство по сравнению с показателями почв региона превышено в 160 раз по данным О. А. Сорокиной. Также отмечено значительное превышение амоннификаторов и олиготрофов. Обращает

на себя внимание существенно меньшая доля олиготрофов и амоннификаторов по отношению к бактериям, усваивающим минеральный азот.

На участке № 2 преобладают олиготрофные бактерии, и их количество превышает показатели по региону (данные О. А. Сорокиной) более чем в 100 раз. Данный вид микроорганизмов характерен для почв с бедным содержанием азота. Отмечена меньшая доля аммонификаторов и бактерий, усваивающих минеральный азот, по сравнению с олиготрофами. Повышенное содержание аммонификаторов обусловлено процессом разложения микроорганизмами азотсодержащих органических соединений.

Возможно предположить, что вблизи с хранилищем азотной кислоты имелись аварийные проливы, что способствовало притоку в почву большого количества азота и повышению численности микробиоты.

Многочисленными исследованиями доказано, что умеренное загрязнение КРТ приводит к увеличению численности и метаболической активности почвенных бактерий.

Это увеличение обусловлено способностью ряда почвенных микроорганизмов использовать азот в качестве источника энергии. Продуцируемая бактериями, усваивающими минеральный азот, биомасса в свою очередь может служить субстратом для других групп микроорганизмов.

В ходе статистической обработки результатов, полученных в эксперименте, было выявлено отсутствие значимых отличий между бактериями, усваивающими минеральный азот, и олиготрофными бактериями, $p > 0{,}05$. При проецировании на оси дискриминации, в свою очередь, был обнаружен общий кластер, состоящий из данных, полученных с участков под номерами 1, 2, 4, что привело к изменению группировки путем объединения микробиологических показателей данных участков в общий кластер. Таким образом, был определен общий кластер с большей статистической значимостью, при этом колонии, высеянные на среду Чапека, не являются статистически значимыми.

Для дальнейших исследований исключили эту среду из расчета. Повторно проведя дискриминантный анализ, получили статистически значимое отклонение от контрольного образца $p < 0{,}02$. На рис. 3 показаны проекции данных изучаемых образцов, отнесенных к различным территориальным группам, на оси дискриминации. Несмотря на отсутствие статистически значимых различий между микробными комплексами территории хранения КРТ и прилегающей территории, из проекции видно, что эти комплексы образуют два обособленных кластера.

В данном случае статистически значимые различия прослеживаются у аммонифицирующих бактерий и олиготрофных бактерий, $p < 0{,}05$. Отмечается повышенное количество микроорганизмов, усваивающих минеральный азот, в почвенных образцах № 5–6. Снижение численности микроорганизмов отмечены в пробах № 1, 4, 8–10.

Известно, что ракетное топливо является достаточно реакционно-способным веществом, при окислении которого образуется целый ряд веществ, оказывающих негативное влияние на биоту. Существенный разброс микробиологических показателей между разными площадками может быть связан с разным уровнем загрязнения. Максимальная антропогенная нагрузка выявлена на пробных площадках № 5, 6. Результаты измерений, полученные с помощью ВПХР, подтверждают опасные концентрации НДМГ и азотной кислоты в почве (табл. 2).

Таблица 1

Пределы варьирования состава микробных комплексов изучаемого участка в сравнении с почвенными микробными комплексами региона, тыс. КОЕ/г

Показатель	Бактерии, усваивающие минеральный азот	Аммонификаторы	Олиготрофы	Сумма
Участок слива и хранения КРТ № 1				
Минимум	1000	1000	3000	5000
Максимум	425000	112000	201000	738000
Участок нейтрализации и очистки стоков № 2				
Минимум	1000	3000	32000	36000
Максимум	22000	76000	201000	299000
Почвы сосновых лесов Средней Сибири (по данным А. В. Богородской)				
Минимум	456	300	717	1473
Максимум	8074	7227	13651	28952
Почвы красноярской лесостепи (по данным О. А. Сорокиной)				
Минимум	1714	700	1376	4304
Максимум	2643	1500	1890	5523

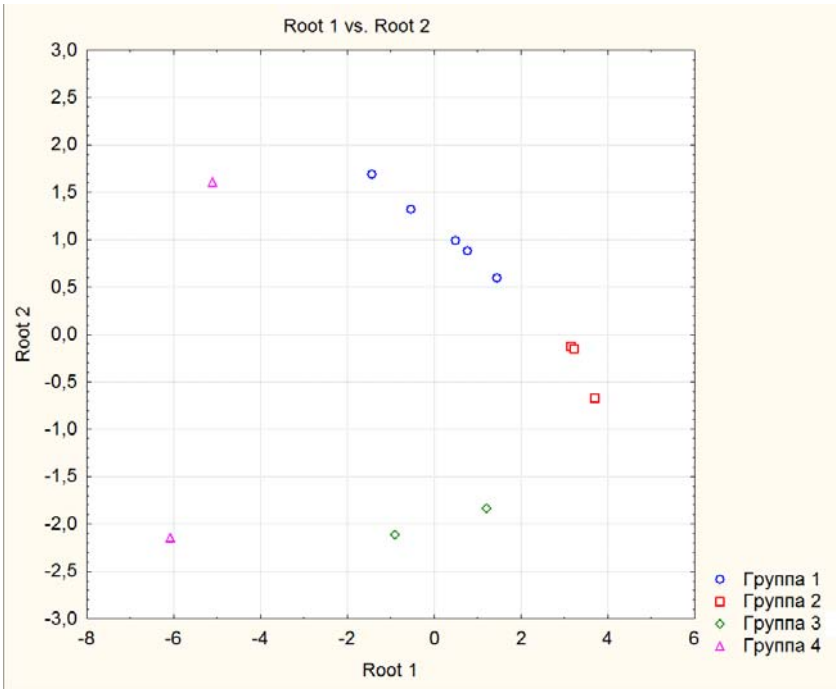


Рис. 3. Проекции данных с изучаемых участков на оси дискриминации

Fig. 3. Projections of data from the studied areas on the axis of discrimination

Таблица 2

Результаты измерений ВПХР на наличие КРТ в почве по окраске индикаторных трубок ИТ-Г1, ИТ-АК, мг/л

№ точки отбора проб	Концентрация		Уровень опасности	
	НДМГ	АК	НДМГ	АК
1	0,001	0,01	Опасно	Малоопасно
2	0,0001	0,02	Малоопасно	Малоопасно
3	0,0001	0,001	Малоопасно	Малоопасно
4	0,001	0,001	Опасно	Малоопасно
5	0,0001	9	Малоопасно	**Очень опасно**
6	0,0001	10	Малоопасно	**Очень опасно**
7	0,0001	0,1	Малоопасно	Опасно
8	0,001	0,2	**Опасно**	**Опасно**
9	0,0001	0,001	Малоопасно	Малоопасно
10	0,0001	0,001	Малоопасно	Малоопасно
11	0,0001	0,001	Малоопасно	Малоопасно
12	0,0001	0,001	Малоопасно	Малоопасно
13	0,0001	0,005	Малоопасно	Малоопасно
14 контроль	**Индикаторная окраска отсутствует, «Не опасно»**			

Полученные результаты показали очень опасные концентрации азотной кислоты в пробах № 5, 6, взятых вблизи хранилищ НДМГ и АК. Проба № 8 содержит опасные концентрации по обоим оцениваемым параметрам, что, возможно, связано с топографическими особенностями местности.

Экспресс-анализ почвенных образцов однозначно указывает на то, что участок № 1, где непосредственно хранились КРТ, является наиболее загрязненным, с максимальным содержанием НДМГ и АК. Стоит также обратить внимание на высокие концентрации НДМГ в пробах № 1, 4.

Заключение.

1. После ликвидации специального объекта из-за попадания в почву значительного количества КРТ сложилась неблагоприятная экологическая обстановка, что нашло своё отражение в сохранении высокого уровня фитотоксичности грунта вблизи сооружений для хранения НДМГ и АК.

2. Математическая обработка показала статистически значимые отличия микробных комплексов исследуемого объекта от микробных комплексов лесов и лесостепей региона, что свидетельствует об экосистемном

нарушении почвенных микробиоценозов изучаемой территории.

3. Максимальная антропогенная нагрузка на окружающую среду отмечена на участке слива и хранения КРТ, высокие концентрации НДМГ отмечены в пробах № 1, 4, 8; азотной кислоты – в пробах № 5, 6.

4. Наименьшее загрязнение почвы отмечено на участке нейтрализации и очистки стоков, проба № 9, 10–13, по показаниям ВПХР.

5. По совокупности данных микробиологического исследования и экспресс-анализа почв выявлены конкретные участки, требующие мер усиленной рекультивации, и зоны, в принципе, способные к саморегенерации с незначительными восстановительными мероприятиями, что непосредственным образом отразится на планировании финансовых затрат при рекультивации данной территории.

Рекомендации:

1. Для ликвидации проливов КРТ рекомендуется проведение мероприятий по рекультивации объекта на основании методики рекультивации грунтов, загрязненных компонентами ракетных топлив, патент РФ № RU 2253520 C1.

2. Для проведения рекультивации рекомендуется разделить территорию на две зоны: первая зона активной рекультивации – вблизи сооружений для хранения КРТ № 1, 4; вторая зона частичной рекультивации – вблизи сооружений нейтрализации и очистки стоков № 2, 3, 5.

Библиографические ссылки

1. Охрана почв от химического загрязнения / Я. М. Аммосова [и др.]. М. : Изд-во МГУ, 1989. 174 с.

2. Асонов Н. Р. Практикум по микробиологии. М. : Агропромиздат, 1988. 155 с.

3. Большаков Г. Ф. Химия и технология компонентов жидкого ракетного топлива. Л. : Химия, 1983. 320 с.

4. Ермаков Е. И., Попова Г. Г., Петрова З. М. Влияние несимметричного диметилгидразина на состояние почвенно-растительной системы // Экологические аспекты воздействия компонентов жидких ракетных топлив на окружающую среду : Материалы науч.-практ. конф. СПб. : РНЦ Прикладная химия, 1996. С. 15–19.

5. Анализ экологической обстановки на объектах хранения ракетного топлива / М. Е. Баранов [и др.]. Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 1044.

6. Седова Г. И., Глебова Л. Ф. К методике оценки загрязнения почвы компонентами ракетных топлив // Бюллетень токсикологии, гигиены и профпатологии ракетных топлив. 1978. № 31. С. 84.

7. Трофимов С. Я. Рекультивация и инвентаризация загрязненных земель // Экология производства. 2006. № 3. С. 56–59.

8. Сергейчик А. Растения и экология. Минск : Урожай, 1997. 224 с.

9. Захаров В. М. Здоровье среды. М. : ЦЭПР, 2000. 65 с.

10. Независимый экологический мониторинг состояния окружающей природной среды вокруг центра ликвидации межконтинентальных баллистических ракет / Занозина В. Ф. [и др.] // Экологические проблемы промышленных городов : сб. науч. тр. по материалам 6-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Саратов, 2013. С. 192–194.

11. Комплексная экологическая оценка районов падения отделяющихся частей ракет-носителей на полигоне Плесецк / А. Б. Бушмарин [и др.] // Экологические аспекты воздействия компонентов жидких ракетных топлив на окружающую среду : Материалы науч.-практ. конф. СПб. : РНЦ «Прикладная химия», 1996. С. 508.

12. Билай В. И. Методы экспериментальной микологии. Киев : Наукова думка, 1982. 550 с.

13. Павлов Н. В., Смольянов А. С., Вайс А. А. Математические методы в лесном хозяйстве / СибГТУ. Красноярск, 2005. 192 с.

14. Черненькова Т. В. Методика комплексной оценки состояния лесных биогеоценозов в зоне влияния промышленных предприятий // Пограничные проблемы экологии : сб. науч. тр. Свердловск : УНЦ АНССР, 1986. С. 127.

15. Седова Г. И., Коваленко И. В. К вопросу о стабильности НДМГ в подзолистой супесчаной почве // Бюллетень токсикологии, гигиены и профпатологии ракетных топлив. 1976. № 23. С. 163.

16. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: http:statsoft.ruresourcesstatistica_text_book.php (дата обращения: 10.9.2017).

References

1. Ammosova Ya. M., Orlov D. S., Sadovnikova L. K. *Okhrana pochv ot khimicheskogo zagryazneniya* [Protection of soils from chemical pollution]. Moskow, Izd-vo MGU Publ., 1989, P. 72–74.

2. Asonov N. R. *Praktikum po mikrobiologii* [Workshop on Microbiology]. Moskow, Agropromizdat Publ., 1988, P. 155.

3. Bol'shakov G. F. *Khimiya i tekhnologiya komponentov zhidkogo raketnogo topliva* [Chemistry and technology of components of liquid rocket fuel]. Leningrad, Himiya Pabl., 1983, P. 320.

4. Ermakov E. I., Popova G. G., Petrova Z. M. [The influence of the asymmetrical dimethylhydrazine on the condition of the soil-plant system]. *Ekologicheskie aspekty vozdejstviya komponentov zhidkikh raketnykh topliv na okruzhayushchuyu sredu. Mat. nauchno-praktich. konf.* [Ecological aspects of the impact of liquid rocket fuel components on the environment]. St. Petersburg, RNC Prikladnaya khimiya Publ., 1996, P. 15–19 (In Russ.).

5. Baranov M. E., Gerasimova L. A., Gerasimova V. E., Khizhnyak S. V. [Analysis of the ecological situation at the sites of storage of rocket fuel]. *Vestnik SibGAU*. 2016, Vol. 17, No. 4, P. 1044 (In Russ.).

6. Sedova G. I., Glebova L. F. [The methodology for the assessment of soil pollution by components of rocket fuels]. *Byulleten' toksikologii, gigieny i profpatologii raketnykh topliv.* 1978, No. 31, P. 84 (In Russ.).

7. Trofimov S. Ya. [Reclamation and inventory of contaminated land]. *Ekologiya proizvodstva*. 2006, No. 3, P. 56–59 (In Russ.).

8. Sergejchik S. A. *Rasteniya i ehkologiya* [Plants and ecology]. Minsk, Urozhay Publ., 1997, P. 224.

9. Zakharov V. M. *Zdorov'e sredy* [Health of the environment]. Moskow, TsEPR Publ., 2000, P. 65.

10. Zanozina V. F., Hmeleva M. V., Samsonova L. E., Zorin A. D., Goryacheva N. M., Markova M. L., Gareev D. R. [Independent environmental monitoring of the environment around center for the elimination of Intercontinental ballistic missiles]. *Ekologicheskie problemyi promyishlennyikh gorodov. Sb. nauchn. trudov* [Ecological problems of industrial cities]. Saratov, 2013, P. 192–194 (In Russ.).

11. Bushmarin A. B., Laskin B. M., Pimkin V. G., Solov'ev V. V., Careva O. A. [Integrated environmental assessment of areas separating from parts of rockets at the site "Plesetsk"]. *Materialy nauchn. prakt. konf. "Ehkologicheskie aspekty vozdejstviya komponentov zhidkikh raketnykh topliv na okruzhayushchuyu sredu"* [Ecological aspects of the impact of liquid rocket fuel components on the environment]. *S*-Pb., Prikladnaya khimiya Publ., 1996, P. 5–8 (In Russ.).

12. Bilay V. I. *Metody eksperimental'noy mikologii* [Metody eksperimental'noy mikologii]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 550 p.

13. Pavlov N. V., Smol'yanov A. S., Vays A. A. *Mathematical methods in forestry* [Mathematical Methods in Forestry]. 2005, Krasnoyarsk, SibGTU Publ., P.192.

14. Chernen'kova T. V. [The method of complex assessment of the state of forest biogeocenosis in the zone of influence of industrial enterprises]. *Pogranichnye problemy ekologii. Sb. nauchn. trudov* [Borderline problems of ecology]. Sverdlovsk, UNTs ANSSR Publ., 1986, P. 116–127 (In Russ.).

15. Sedova G. I., Kovalenko I. V. *K voprosu o stabil'nosti NDMG v podzolistoy supeschanoy pochve. Byulleten' toksikologii, gigieny i profpatologii raketnykh topliv* [Bulletin of Toxicology, Hygiene and Occupational Pathology of Missile Fuels]. 1976, No. 23, P. 163.

16. Electronic textbook StatSoft. Available at: http:statsoft.ruresourcesstatistica_text_book.php (accessed 10.9.2017).

© Баранов М. Е., Герасимова Л. А., Хижняк С. В.
Дубынин П. А., Клешнина И. А., 2017

УДК 67.02

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 897–901

СТАТИЧЕСКИЙ И МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРЕЦИЗИОННОГО КРУПНОГАБАРИТНОГО АНТЕННОГО РЕФЛЕКТОРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Ю. Власов, Н. А. Амельченко, К. А. Пасечник, М. А. Титов, М. В. Сержантова*

Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: 2074213@gmail.com

Представлена конструкция прецизионного крупногабаритного антенного рефлектора из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных волокон. Применение углеродных волокон позволяет достичь оптимального коэффициента линейного теплового расширения и относительно высокой жесткости конструкции в целом. Совокупность механических и точностных характеристик позволяет использовать углепластиковые рефлекторы в наземных приемопередающих станциях спутниковой связи, работающих на высоких частотных диапазонах. Основной задачей данной статьи является получение оптимальной силовой конструкции, обеспечивающей геометрическую стабильность рабочей поверхности рефлектора диаметром апертуры более 10 м и рабочим частотным диапазоном 42,5–45,5 ГГц из полимерных композиционных материалов, устойчивой к воздействию внешних деструктивных факторов.

Разработанная модель рефлектора включает трубный силовой каркас, сегменты отражающей поверхности и ступицу. Силовой каркас рефлектора состоит из плоских ферм, дополненных стержнями таким образом, что при сборке образуется пространственная конструкция с осевой симметрией. Особенность конструкции заключается в применении сварных соединений элементов силовых труб с фитингами, что существенно уменьшает массу готового изделия и повышает собственную частоту колебаний изделия в целом. Сегменты – это трехслойные оболочки из полимерных композиционных материалов с заполнителем.

Предложенная модель рефлектора была проанализирована с помощью метода конечных элементов с граничными условиями: ветровая нагрузка 20 м/с в раскрыв рефлектора; воздействие гравитации на рефлектор, ориентированный на зенит. Ветровая нагрузка моделировалась как равномерно распределенное давление, приложенное к сегментам. Полученные значения среднеквадратичного отклонения (СКО) геометрии и собственной частоты колебаний рефлектора из полимерных композиционных материалов на основе угольных волокон достаточны для работы наземной станции спутниковой связи в высоких радиочастотных диапазонах Ka, Q и V.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, рефлектор, антенна.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 897–901

STATIC AND MODAL ANALYSIS OF THE POWER CONSTRUCTION OF THE PRECISION LARGE-SIZED ANTENNA REFLECTOR FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A. Y. Vlasov, N. A. Amel'chenko, K. A. Pasechnik, M. A. Titov, M. V. Serzhantova*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: 2074213@gmail.com

The design of a precision large-size antenna reflector made of polymer composite materials (PCM) based on carbon fibers is presented in the article. Such reflectors are used for operation in high frequency ranges, since they have a low coefficient of linear thermal expansion and a high modulus of elasticity. Therefore, the main task of this work is to design the geometric accuracy of the reflector working surface from composite materials with a diameter of more than 10 meters and a frequency range of 42.5–45.5 GHz.

The developed model of the reflector includes a power frame, segments of the reflecting surface and a hub. The power frame of the reflector consists of flat trusses supplemented with rods, so that during assembly a spatial construction with axial symmetry is formed. Segments are three-layer casings of polymer composite materials with filler.

The proposed model of the reflector was analyzed using the finite element method with boundary conditions: a wind load of 20 m/s in the opening of the reflector; Impact of gravity on the reflector, oriented to the zenith. The wind load was modeled as a uniformly distributed pressure applied to the segments. The obtained mean square deviation (SDE) of

the geometry and natural oscillation frequency of a reflector made from polymer composite materials based on carbon fibers is sufficient for operation of the satellite earth station in high radio-frequency ranges Ka, Q and V.

Keywords: polymer composite materials, reflector, antenna.

Введение. В настоящее время системы на базе спутников HTS (High Throughput Satellite) характеризуются использованием высоких частотных диапазонов, в том числе *Ka* (18,2–21,2 ГГц), *Q* (42,5–45,5 ГГц) и *V* (50–70 ГГц) [1]. Обеспечение широкополосных каналов связи требует создания крупногабаритных прецизионных рефлекторов антенн диаметром более 10 м, работающих в радиочастотных диапазонах *Ka*, *Q* и *V*. Задачей проектирования является достижение геометрической точности рабочей поверхности рефлектора, выраженной через СКО [2] от номинальной формы

$$\sqrt{1/n\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2},$$

где n – объем выборки точек поверхности рефлектора; $\bar{x}$ – среднее арифметическое выборки; x_i – элемент выборки, а также обеспечение стойкости к механическим воздействиям и климатическим факторам.

Примерами крупногабаритных прецизионных рефлекторов являются IRAM (30-метровый и 15-метровый телескоп, Испания, Франция), Tian Ma (65 м, Китай, США), CSO (10 м, Гаваи), APEX (12 м, Чили), ALMA (12 м, Чили) [3–7]. Приведенные примеры проектов являются радиотелескопами, СКО отражающей поверхности которых варьируется от 0,015 до 0,03 мм при диаметрах до 12 м и до 0,3 мм при диаметре 65 м. Однако применение подобных технических решений для конструкций рефлекторов ЗССС неприемлемо из-за высокой стоимости и сложности технического обслуживания.

Постановка задачи. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных волокон имеют низкий коэффициент линейного теплового расширения и высокий модуль упругости [8]. Задачей данной работы является разработка крупногабаритной интегральной размеростабильной конструкции рефлектора из ПКМ, работающего в диапазоне 42,5–45,5 ГГц с низким значением среднеквадратичного отклонения отражающей поверхности и высокой жесткостью конструкции.

Допустимый интервал значений СКО для *Q*-частотного диапазона с длиной волны λ = 6,58–7,05 мм определяется соотношением $\sigma_{доп} = \lambda/50$, что составляет 0,13 мм в случае отсутствия ветровой нагрузки, и соотношением $\sigma_{доп} = \lambda/12$ [9], что составляет 0,55 мм в случае ее наличия.

Описание модели. Разработанная модель рефлектора включает три части: силовой каркас, сегменты отражающей поверхности, ступицу [10; 11].

Силовой каркас – пространственная ферменная конструкция, предназначенная для обеспечения жесткости, прочности и температурной размеростабильности отражающей поверхности рефлектора (рис. 1).

Разработанная конструкция рефлектора состоит из плоских ферм, которые упрощают ее изготовление, сборку и транспортировку. Плоские фермы собираются отдельно, что обеспечивает высокую точность сборки. Совместно с дополнительными соединительными стержнями плоские фермы монтируются под углом 58°30′ относительно нормали, восстановленной к основанию рефлектора. Предлагаемое решение поставленной задачи позволяет изготовить силовой каркас, состоящий из набора плоских ферм двух типов 5-рядных и 3-рядных (рис. 1, 2), дополненных стержнями, узлы которых соединяют между собой плоские фермы таким образом, что при сборке образуется пространственная конструкция с осевой симметрией.

Стержни выполнены из углепластиковых труб диаметром 60 мм двух типов, с толщиной стенки 1,4 и 2,8 мм. Усиленные трубы располагаются в наиболее нагруженных частях силового каркаса – первом и втором ряду. В расчетах материал стержней считается изотропным с модулем упругости 70 ГПа.

Форма и габаритные размеры сегментов отражающей поверхности определяют расположение узловых точек силового каркаса в результате решения оптимизационной задачи по определению пространственной структуры каркаса, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям.

Сегменты – трехслойные оболочки, лицевая и тыльная поверхности которых выполнены из ПКМ, в качестве заполнителя используется конструкционный пенопласт [12].

Ступица – сварная металлоконструкция цилиндрической формы, имеет интерфейсные точки крепления на опорно-поворотном устройстве.

Результаты исследования. Предложенная модель рефлектора была проанализирована с помощью метода конечных элементов [13; 14] со следующими граничными условиями: ветровая нагрузка 20 м/с в раскрыв рефлектора; воздействие гравитации на рефлектор, ориентированный на зенит. Силовой каркас моделировался балочными конечными элементами, сегменты – поверхностными конечными элементами. Сегменты жестко связаны с узлами силового каркаса. Точки крепления каркаса к ступице заданы жесткой заделкой.

Ветровая нагрузка моделировалась как равномерно распределенное давление, приложенное к сегментам. Сила тяжести учитывалась пропорционально массе элементов конструкций для каждого узла конечно-элементной сетки.

Расчетное значение СКО без ветровой нагрузки составляет 0,16 мм, включая тепловые деформации – 0,11 мм и гравитационные – 0,05 мм. При ветровых нагрузках вклад в деформации составляет 0,28 мм, и максимальное расчетное значение СКО увеличивается до 0,44 мм. Полученные значения СКО лежат в допустимом интервале отклонений для *Q*-диапазона. На рис. 3 приведен график зависимости СКО от диаметра рефлектора, изготовленного из различных конструкционных материалов, который показывает, что применение углепластика позволяет получить крупногабаритную размеростабильную конструкцию.

Проведённый модальный анализ силового каркаса рефлектора показал, что первая собственная частота составляет 47 Гц при массе конструкции около 800 кг, в то время как для аналогичных рефлекторов КАТ-7 диаметром 12 м собственная частота составляет 4 Гц [15]. Это свидетельствует о высокой жесткости разработанной конструкции.

Заключение. Разработанная модель крупногабаритного рефлектора из полимерных композиционных материалов на основе угольных волокон обладает высокой жесткостью конструкции и СКО отражающей поверхности в интервале от 0,13 до 0,55 мм, что обеспечивает стабильную работу ЗССС в диапазоне 42,5–45,5 ГГц.

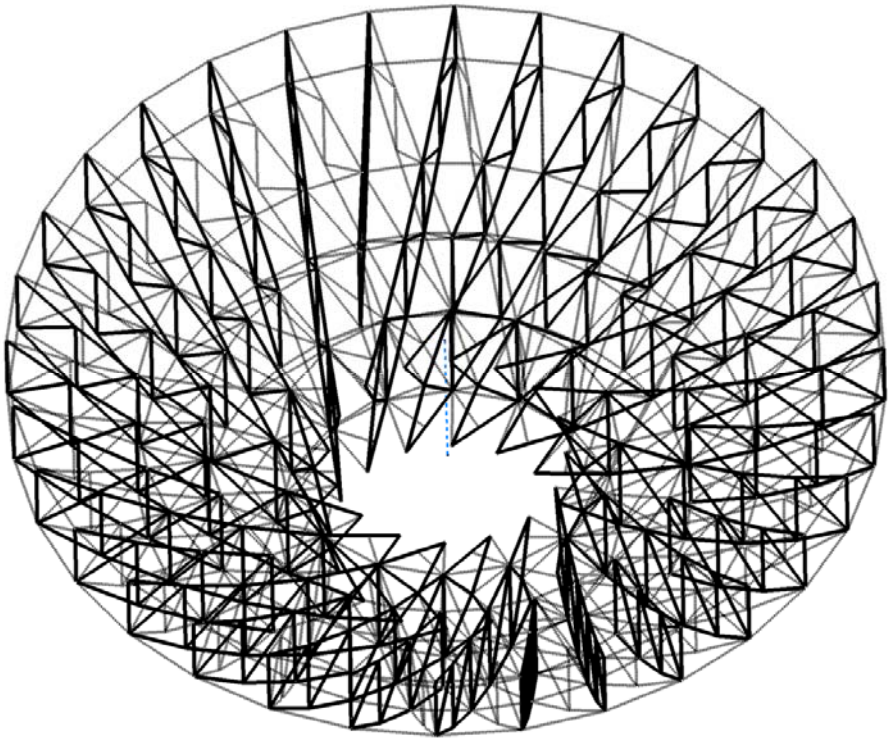


Рис. 1. Общий вид фермы рефлектора

Fig. 1. General view of the reflector truss

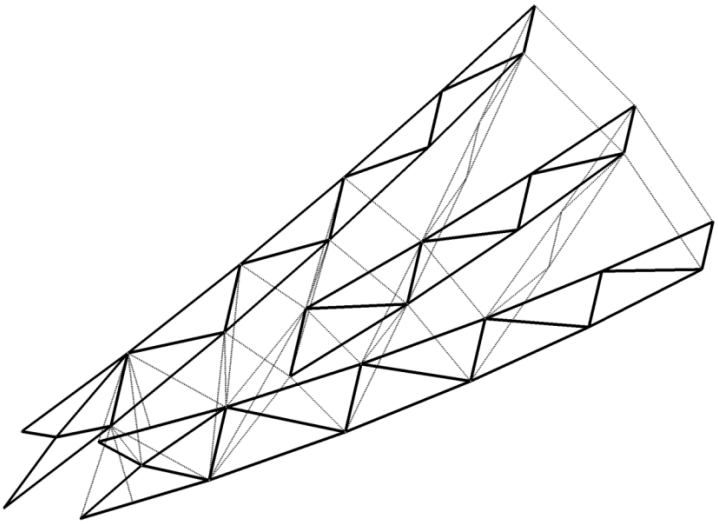


Рис. 2. Повторяющийся элемент фермы рефлектора
(утолщенными линиями изображены плоские радиальные фермы)

Fig. 2. Regular element of the reflector truss
(the thickened lines show flat radial trusses)

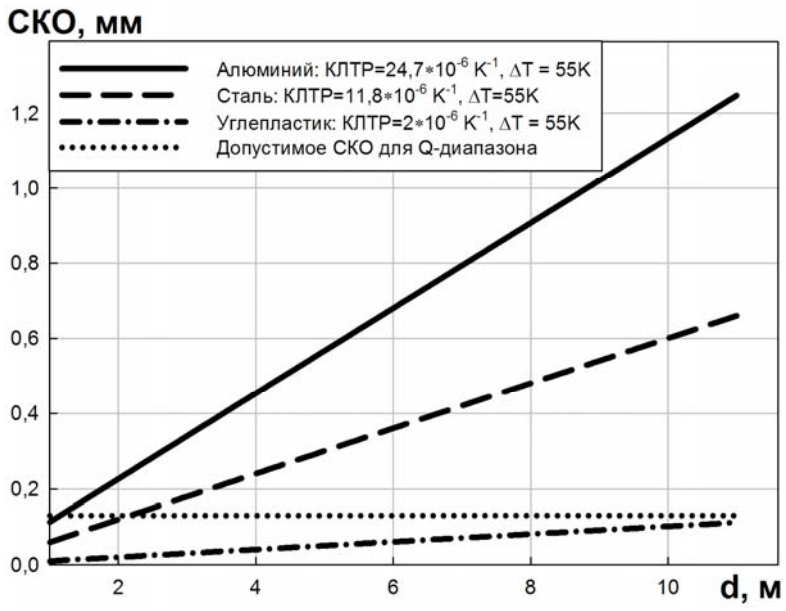


Рис. 3. График функции СКО

Fig. 3. Standart deviation function graph

Благодарности. Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки России). Договор № 02.G25.31.0147.

Acknowledgments. The work was carried out during the implementation of a comprehensive project with the financial support of the Government of the Russian Federation (Ministry of Education and Science of Russia). Contract No. 02. G25.31.0147.

Библиографические ссылки

1. Тестоедов Н. А., Кузовников А. В. Перспективы и приоритеты развития информационных спутниковых систем // Исследования наукограда. 2017. № 1 (19). С. 7–10.

2. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М. : Физматлит, 2008. 312 с.

3. Верещагин Е. М. Антенны и распространение радиоволн. М. : Воениздат, 1964. 240 с.

4. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн. М. : Радио и связь, 1984. 208 с.

5. Scott C. Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design. London : Artech House Boston, 1990. 144 p.

6. Cheng J. The principles of astronomical telescope design. New York : Springer, 2009. 631 p.

7. Христиансен У., Хёгбом И. Радиотелескопы. М. : Мир, 1988. 304 с.

8. Систематизация базисных факторов, препятствующих внедрению полимерных композиционных материалов в России (обзор) [Электронный ресурс]. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=958.

9. Фролов О. П., Вальд В. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. М. : Горячая Линия – Телеком, 2008. 496 с.

10. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Конструкторско-технологические аспекты создания прецизионных изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов // Вестник СибГАУ. 2015. № 2 (17). С. 460–466.

11. Власов А. Ю., Титов М. А., Пасечник К. А. Разработка оптимальной конструктивно-силовой схемы шестисегментного офсетного антенного рефлектора с применением полимерных композиционных материалов // Международный научно-технический журнал. Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10, С. 28–33.

12. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Разработка технологии частичного отверждения тонкостенных оболочек при создании конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестник СибГАУ. 2015. № 4 (16). С. 918–924.

13. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: конечно-элементное моделирование конструкции / А. Ю. Власов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 73–78.

14. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Определение диапазонов изменения ключевых параметров, обеспечивающих стабильность технологического процесса производства изделий сложной формы из ПКМ методом RTM // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 197–201.

15. Engineering and Science Highlights of the KAT-7 Radio Telescope / A. R. Foley [et al.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2016. 000. P. 1–17.

References

1. Testoedov N. A., Kuzovnikov A. V. [Prospects and priorities for the development of information satellite systems]. Issledovaniya naukograda. 2017, No. 1 (19), P. 7–10 (In Russ.).

2. Beklemishev D. V. *Kurs analiticheskoi geometrii i lineinoi algebry* [The Course of Analytic Geometry and Linear Algebra]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 312 p.

3. Vereshchagin E. M. *Antenny i rasprostranenie radiovoln* [Antennas and propagation of radio waves]. Moscow, Voenizdat Publ., 1964, 240 p.

4. Vud P. *Analiz i proektirovanie zerkal'nykh antenn* [Analysis and design of mirror antennas]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984, 208 p.

5. Scott C. Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design. London: Artech House Boston, 1990, 144 p.

6. Cheng J. The principles of astronomical telescope design. New York: Springer, 2009, 631 p.

7. Khristiansen U., Khegbom I. *Radioteleskopy* [Radiotelescopes]. Moscow, Mir Publ., 1988, 304 p.

8. *Sistematizatsiya bazisnykh faktorov, prepyatstvuyushchikh vnedreniyu polimernykh kompozitsionnykh materialov v Rossii (obzor)* [Systematization of basic factors impeding the introduction of polymer composite materials in Russia (overview)] (In Russ.). Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=958.

9. Frolov O. P., Val'd V. P. *Zerkal'nye antenny dlya zemnykh stantsii sputnikovoi svyazi* [Mirror antennas for satellite earth stations]. Moscow, Goryachaya Liniya–Telekom Publ., 2008, 496 p.

10. Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Martynov V. A. [Design–Technological Aspects of Creating Precision Products of Complex Form from Polymer Composite Materials]. *Vestnik SibGAU*. 2015, No. 2 (17), P. 460–466 (In Russ.).

11. Vlasov A. Yu., Titov M. A., Pasechnik K. A. [Development of the optimal constructive-power scheme of a six-segment offset antenna reflector using polymer composite materials]. *Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2015, No. 10, P. 28–33 (In Russ.).

12. Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Martynov V. A. [Development of the technology of partial curing of thin-walled casings when creating a structure of polymer composite materials]. *Vestnik SibGAU*. 2015, No. 4 (16), P. 918–924 (In Russ.).

13. Vlasov A. Yu., Lopatin A. V. et al. [Development of precision antenna reflectors from polymer composite materials: finite element simulation of the structure]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3 (49), P. 73–78. (In Russ.).

14. Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A. et al. [Description of the ranges of changes in key parameters that ensure the stability of the technological process, the information of complex shapes from PCM by the RTM method]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 4 (56), P. 197–201 (In Russ.).

15. Foley A. R. et al. Engineering and Science Highlights of the KAT-7 Radio Telescope. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016, 000, P. 1–17.

© Власов А. Ю., Амельченко Н. А., Пасечник К. А., Титов М. А., Сержантова М. В., 2017

УДК 662.822

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 902–909

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ КАРДАННЫХ ШАРНИРОВ

С. П. Ереско, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин*, В. А. Меновщиков, А. Е. Михеев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: ironjeck@mail.ru

Приведен обзор конструкций испытательных стендов для испытания кардных передач, таких как стенд для испытаний карданных подшипников (недостаток данного стенда – это применение в качестве нагружающего устройства торсионных валов, что снижает точность создания нагрузок в шарнирах карданной передачи); стенды с невозможностью управления процессом нагружения карданной передачи во время испытаний карданной передачи; стенд с замкнутым силовым контуром для испытания агрегатов трансмиссии транспортных средств и стенд для испытаний агрегатов трансмиссий транспортных средств, недостатком которых является быстрый перегрев системы торможения, который возникает из-за отсутствия системы охлаждения. Задачей исследования является создание новых конструкций испытательных стендов на основе проведенного анализа конструкций испытательных стендов. Технической задачей стендов для испытания карданных шарниров на игольчатых подшипниках является испытание карданных передач в широком диапазоне нагрузок, сравнительные испытания шарниров различных типоразмеров. Проведен анализ стендов для испытаний карданных передач на игольчатых подшипниках, в результате которого появилась необходимость создания новой конструкции, отличающейся большим диапазоном параметров нагружения и легкостью настройки. Возникает необходимость создания конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с повышенной точностью настройки угла излома карданной передачи и удобством эксплуатации, а также создания конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с исключением перегрева системы торможения и обеспечит плавность регулирования тормозного момента. Поставленная задача создания новой конструкции, отличающейся большим диапазоном параметров нагружения и легкостью настройки, решается тем, что привод соединен с карданной передачей с помощью муфты через технологическую передачу, а устройство нагружения подключено через раздаточную коробку. Поставленная задача создания конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с повышенной точностью настройки угла излома карданной передачи и удобством эксплуатации, решается тем, что в известном стенде для испытания карданных передач содержатся установленные на основной раме электродвигатель, технологическая передача, выполненная в виде механической коробки переключения передач, присоединенной к входному валу испытываемой карданной передачи, при этом выходной вал карданной передачи соединен с устройством нагружения через раздаточный редуктор, а раздаточный редуктор установлен на дополнительной раме, имеющей возможность перемещения по прорезям основной рамы с фиксацией положения раздаточного редуктора в горизонтальной плоскости по нониусу, отградуированному в единицах угла излома карданной передачи. Поставленная задача создания конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с исключением перегрева системы торможения, а также обеспечить плавность регулирования тормозного момента, решается тем, что устройство нагружения выполнено в виде гидронасоса, вал которого присоединен к выходному валу раздаточного редуктора, входной канал гидронасоса соединен с гидравлическим баком, а выходной канал соединен со входом регулируемого дросселя, выход которого через теплообменник соединен с гидравлическим баком, причем между выходным каналом гидронасоса и входом дросселя установлены предохранительный клапан и манометр, отградуированный в единицах тормозного момента. Конструкция первого предложенного стенда позволяет испытывать карданные передачи разных типоразмеров в широком диапазоне нагружающих моментов и скоростей вращения карданных передач. Конструкция второго предложенного стенда позволяет испытывать карданные передачи разных типоразмеров в широком диапазоне нагружающих моментов, скоростей вращения и высокой точности настройки угла излома карданной передачи. Конструкция третьего предложенного стенда позволяет проводить испытания карданных передач, исключая перегрев системы торможения благодаря охлаждению рабочей жидкости, а также повысить качество эксплуатации за счет обеспечения плавности регулирования тормозного момента.

Ключевые слова: стенд для испытаний, карданный шарнир, игольчатые подшипники, современные представления исследований, конструкция стенда, сравнительный анализ.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 902–909

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURES TEST APPARATUS FOR UNIVERSAL JOINT

S. P. Eresko, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin*, V. A. Menovschikov, A. E. Mikheev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: ironjeck@mail.ru

An overview of the construction of test benches for testing carded transmission, such as a stand for the universal joint bearing tests, the lack of a stand is used as a loading device torsion shaft, which reduces the accuracy of creating stress in the joints of the driveline; stands with the inability to control the process of loading the driveline during driveline tests; stand with a closed loop power transmission units for testing of vehicles and stand the test of aggregates of transmissions of vehicles, lack of which is the rapid overheating of the braking system, which occurs due to lack of cooling system is given. The aim of the study is to create a new design of test benches based on our analysis of test benches designs. An object stands for testing of universal joints with needle bearings is to test the driveline in a wide range of loads, comparative tests of joints of various sizes. The analysis stands for driveline test on needle bearings, as a result of which there was a need for a new design, a large range of different parameters of loading and ease of configuration; it is necessary to create a design system that allows testing of cardan transmission with high precision adjustment of the angle of fracture driveline and ease of use; it is necessary to create a design system that allows testing driveline with the exception of overheating the braking system, as well as to ensure smooth regulation of the braking torque. The task of creating a new design, a large range of different parameters of loading and ease of configuration is achieved in that the drive is connected to the driveline via coupling through technology transfer and loading device is connected through a transfer case. The task of creating design systems that will allow testing of cardan transmission with high precision adjustment of the angle of fracture driveline and operating convenience is achieved in that, in a tester in driveline, which includes, mounted on the main frame: motor technology transfer, made in the form of a mechanical gearbox, connected to the input shaft of the test driveline, wherein the output shaft of the driveline is connected to a load device through the draw gear and, distributing gear is mounted on an additional frame, which has the ability to move along the slits the main frame with fixing the position of the dispensing gear in the horizontal plane vernier, calibrated in units of angle fracture driveline. The task of creating design systems that will allow testing driveline with the exception of overheating the braking system, as well as to ensure smooth regulation of the braking torque, is achieved in that the loading device is designed as a hydraulic pump, the shaft of which is connected to the output shaft of the transfer gear and the input channel a hydraulic pump connected to the tank, and the outlet duct connected to the inlet throttle controlled, through a heat exchanger whose output is connected to the hydraulic tank, wherein the outlet channel between the hydraulic pump and the inlet throttle and a relief valve mounted manometer Suitably calibrated in terms of brake torque. Construction of the first of the proposed stand allows you to experience the driveline of different sizes in a wide range of load torque and driveline speeds. The construction of the second sentence of the stand allows you to experience the driveline of different sizes in a wide range of load torque, rotational speed and high precision tuning fracture driveline angle. The construction of the third sentence of the stand allows testing driveline, excluding overheating of the braking system by cooling the working fluid, and improve operational excellence by providing smooth regulation of the braking torque.

Keywords: test stand, universal joint, needle bearings, modern concepts of research, booth design, comparative analysis.

Введение. В стендах, применяемых для испытаний карданных передач машин, вращение карданного вала осуществляется аналогично принятой схеме транспортных и технологических машин, а регулирование осуществляется с помощью редукторов. Существует множество стендов для испытания карданных передач, основанных на схожих принципах, но имеющих значительные различия в конструкции, а также свои преимущества и недостатки.

Подшипниковые узлы являются важнейшими структурными элементами машин и составляют основную часть узлов трения. Отказ зачастую происходит из-за отказа подшипниковых узлов, которые ограничивают долговечность машин. Даже при достаточно качественном изготовлении деталей подшипниковых узлов, например, игольчатого подшипника качения, характеристики карданной передачи могут оказаться неудовлетворительными, и произойдет внезапный отказ. При этом под отказом следует понимать не обязательно разрушение трущихся (рабочих) поверхностей, а выход одной из характеристик подшипниковых узлов за допускаемые пределы.

Подшипниковые узлы сельскохозяйственной техники выходят из строя в основном из-за абразивного изнашивания, связанного с попаданием грязи и пыли. Наиболее распространенный критерий отказа подшипниковых узлов общего применения, работающих в автомобилях, тракторах, насосах, редукторах, станках, подъемно-транспортном оборудовании, – усталостное разрушение. В то же время для подшипниковых узлов специального применения важны и другие характеристики, такие как жесткость, уровень и спектр

вибрации, момент сопротивления вращению, долговечность и др. [1].

Анализ работ [2–6] показывает, что на современном этапе развития науки и техники повышение качества и конкурентоспособности карданных шарниров на игольчатых подшипниках и карданных передач различных технологических и подъёмно-транспортных машин является одним из важнейших и современных условий, без которых не может быть достигнут научно-технический прогресс. Но до сих пор многие вопросы ещё не получили чёткого ответа ввиду неизученности либо отсутствия нужного объёма исследований.

Постановка задачи исследования. Задачей исследований является создание новых конструкций испытательных стендов для испытаний карданных передач в широком диапазоне нагрузок, сравнительных испытаний шарниров различных типоразмеров, испытаний карданных передач с повышенной точностью настройки угла излома карданной передачи и удобством эксплуатации, испытаний карданных передач с исключением перегрева системы торможения, а также обеспечения плавности регулирования тормозного момента на основе проведенного анализа имеющихся конструкций испытательных стендов.

Анализ конструкций карданных шарниров. Проведенный патентный поиск и анализ конструкций выявил ряд устройств, направленных на решение поставленных задач, таких как испытание карданных передач в широком диапазоне нагрузок, сравнительные испытания шарниров различных типоразмеров, создание новой конструкции, отличающейся большим диапазоном параметров нагружения и легкостью настройки, создание конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с повышенной точностью настройки угла излома карданной передачи и удобством эксплуатации, создание конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с исключением перегрева системы торможения, а также обеспечить плавность регулирования тормозного момента.

Известен стенд для испытаний карданных подшипников [7]. Привод стенда осуществляется от электродвигателя через ременную передачу к замкнутому контуру, состоящему из двух зубчатых редукторов, торсионных и карданных валов, двух муфт. Нагрузка в замкнутом контуре создается закручиванием торсионных валов муфтой нагружения. Для испытаний карданных валов разной длины и создания перекосов в шарнирах редуктор может быть перемещен по пазам на плите в продольном и поперечном направлениях. Недостаток данного стенда – это применение в качестве нагружающего устройства торсионных валов, что снижает точность создания нагрузок в шарнирах карданной передачи.

Известен стенд, который содержит электродвигатель, нагрузочное устройство, ременную передачу, передаточный вал, установленный на опорах качения и через кривошип соединенный с валом в опорах, при этом нагрузочное устройство выполнено в виде вала, на котором по краям расположены опоры, а между ними – нагрузочный блок, на котором укреплен трос с грузом [8]. К недостаткам стенда можно отнести невозможность управления процессом нагружения карданной передачи во время испытаний карданной передачи.

Известен стенд, содержащий технологическую карданную передачу, состоящую из полого вала, полых крестовин с внешними вилками и двух валов с элементами, служащими для присоединения к испытываемой карданной передаче [9]. В стенд входит также нагружатель, который содержит рычаги и резьбовые стяжки. К недостаткам стенда относится невозможность управления процессом нагружения карданной передачи во время испытания.

Известен стенд, который состоит из станины, привода, кинематически связанного с одним из валов испытываемой карданной передачи, устройства нагружения, последовательно включенного в силовой контур, технологического карданного шарнира с полой крестовиной, элементов для присоединения испытываемой карданной передачи [10]. При этом одна вилка технологического карданного шарнира жестко связана через присоединительные элементы с одной из внешних вилок испытываемой карданной передачи, а другая вилка технологического карданного шарнира выполнена полой и связана через устройство нагружения и присоединительные элементы с другой из внешних вилок испытываемой карданной передачи. К недостаткам стенда можно отнести невозможность управления процессом нагружения карданной передачи во время испытания и невозможность регулирования угла излома карданной передачи.

Известен стенд с замкнутым силовым контуром для испытания агрегатов трансмиссии транспортных средств [11], который имеет приводной двигатель, вспомогательные передачи и последовательно включенный в силовой контур нагружатель, имеющий регулируемый тормоз, выполненный в виде гидронасоса с регулируемым дросселем, установленным в его нагнетательной магистрали. Известен стенд для испытаний агрегатов трансмиссий транспортных средств, имеющий приводной двигатель, гидронасос, нагрузочную гидромашину, регулятор нагрузки в виде регулируемого дросселя, предохранительный клапан, гидравлический бак, сообщенный с входным каналом гидронасоса и выходным каналом приводной гидромашины, выходной канал нагрузочной гидромашины сообщен с выходным каналом гидронасоса и с входным каналом приводной гидромашины [12]. Основным недостатком стендов является быстрый перегрев системы торможения, который возникает из-за отсутствия системы охлаждения.

Результаты проведенного анализа. Поставленная задача создания новой конструкции, отличающейся большим диапазоном параметров нагружения и легкостью настройки, решается тем, что привод соединен с карданной передачей с помощью муфты через технологическую передачу, а устройство нагружения подключено через раздаточную коробку (рис. 1).

Стенд состоит из электродвигателя *1*, механической коробки переключения передач *2*, присоединенной к входному валу карданной передачи *3*, и устройства нагружения *4*, присоединенного к выходному

валу карданной передачи посредством раздаточного редуктора *5*.

За счет использования пониженной передачи раздаточной коробки (рис. 2) к муфте *1* подсоединяется карданная передача, а к полумуфте *2* подсоединяется устройство нагружения, за счёт этого можно получить удвоенные нагрузки при испытаниях или использовать нагрузочное устройство с меньшим тормозным моментом. Нагрузочное устройство выполнено таким образом, что позволяет моделировать вращающий момент на испытуемом шарнире, что приближает испытание к реальным условиям нагружения карданных шарниров в условиях эксплуатации.

Стенд работает следующим образом (рис. 1). Вращающий момент от электродвигателя *1* через механическую коробку переключения передач *2* передается на карданную передачу *3*. Коробка переключения передач *2* позволяет менять частоту вращения карданной передачи. Раздаточный редуктор *5* при этом передает карданной передаче тормозной момент, создаваемый устройством нагружения *4*, и карданная передача работает под нагрузкой. Раздаточный редуктор *5* позволяет либо отключать нагрузку для удобства монтажных операций, либо подключать нагрузку в режимах повышенных или пониженных передач, что позволяет дополнительно управлять нагружающим моментом и скоростью вращения испытываемых карданных передач.

Стенд представляет собой систему узлов, последовательно установленных на раме. Привод *1* присоединен к технологической передаче. Технологическая передача выполнена в виде механической коробки переключения передач *2*, присоединена к входному концу карданной передачи *3* и позволяет менять частоту вращения. Устройство нагружения *4*, присоединенное к противоположному концу карданной передачи *3* с помощью раздаточной коробки *5*, позволяет моделировать различные по величине нагрузки, как статические, так и динамические.

Поставленная задача создания конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с повышенной точностью настройки угла излома карданной передачи и удобством эксплуатации, решается тем, что в известном стенде для испытания карданных передач [13] содержатся установленные на основной раме электродвигатель, технологическая передача, выполненная в виде механической коробки переключения передач, присоединенной к входному валу испытываемой карданной передачи, при этом выходной вал карданной передачи соединен с устройством нагружения через раздаточный редуктор, а раздаточный редуктор установлен на дополнительной раме, имеющей возможность перемещения по прорезям основной рамы с фиксацией положения раздаточного редуктора в горизонтальной плоскости по нониусу, отградуированному в единицах угла излома карданной передачи (рис. 3).

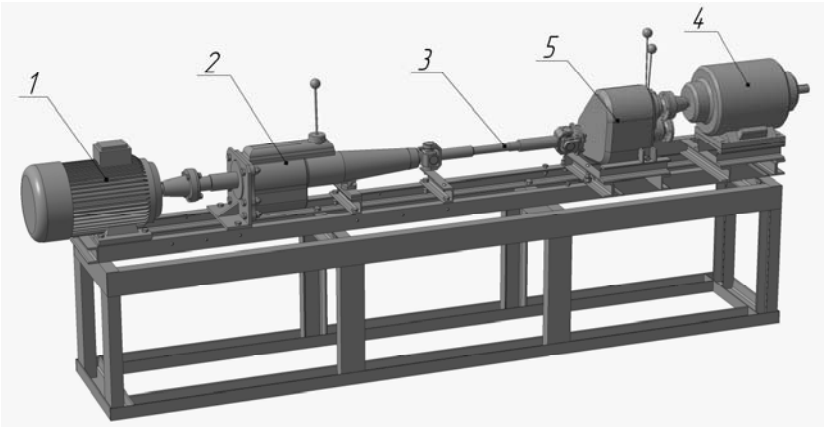


Рис. 1. Стенд для испытания карданных шарниров на игольчатых подшипниках

Fig. 1. Testing bench for probation of the cardan joint on the needle bearer

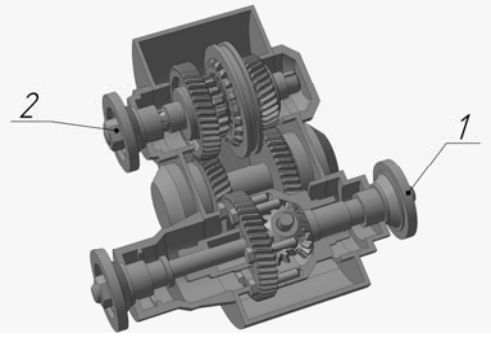


Рис. 2. Схема подключения раздаточной коробки передач

Fig. 2. Connection diagram of the distribution box

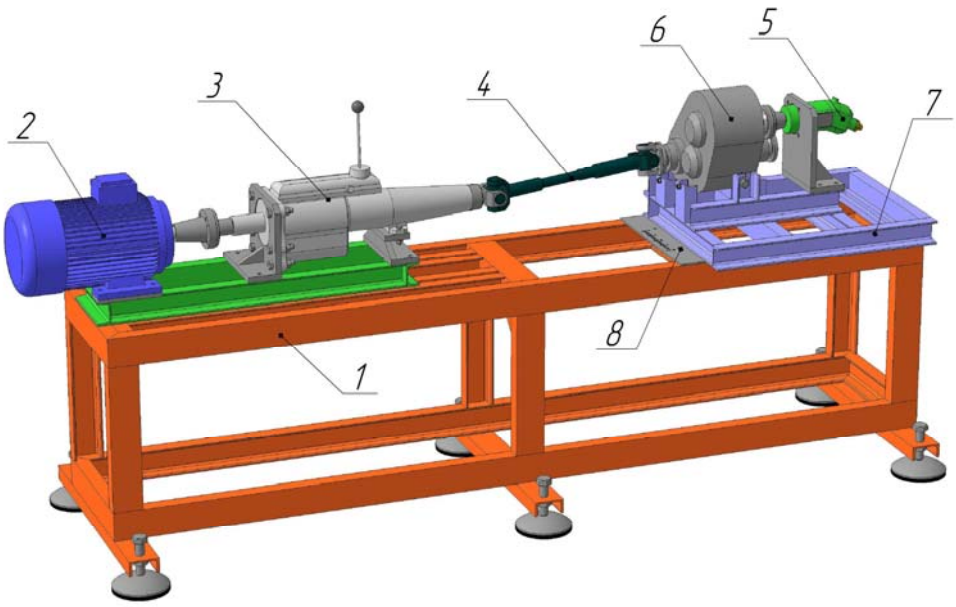


Рис. 3. Стенд для испытания карданных шарниров на игольчатых подшипниках

Fig. 3. Testing bench for probation of the cardan joint on the needle bearer

Стенд состоит из установленных на основной раме *1* электродвигателя *2*, механической коробки переключения передач *3*, присоединенной к входному валу карданной передачи *4*, и устройства нагружения *5*, присоединенного к выходному валу карданной передачи посредством раздаточного редуктора *6*. Раздаточный редуктор *6* с устройством нагружения *5* установлен на дополнительной раме *7* с возможностью перемещения по прорезям основной рамы *1* и фиксацией положения раздаточного редуктора в горизонтальной плоскости по нониусу *8*, отградуированному в единицах угла излома карданной передачи.

Стенд работает следующим образом: вращающий момент от электродвигателя *2* через механическую коробку переключения передач *3* передается на карданную передачу *4*. Механическая коробка переключения передач *3* позволяет менять частоту вращения испытываемой карданной передачи. Раздаточный редуктор *6* при этом передает карданной передаче тормозной момент, создаваемый устройством нагружения *5*, и карданная передача работает под нагрузкой. Раздаточный редуктор *6* позволяет либо отключать нагрузку для удобства монтажных операций, либо подключать нагрузку в режимах повышенных или пониженных передач, что расширяет пределы изменения нагружающего момента и скорости вращения испытываемых карданных передач. Настройка угла излома карданной передачи *4* осуществляется с помощью нониуса *8* путем перемещения дополнительной рамы *7* по прорезям основной рамы *1* и фиксацией положения дополнительной рамы *7* в горизонтальной плоскости по нониусу *8*, отградуированному в единицах угла излома карданной передачи.

Поставленная задача создания конструкции систем, которая позволит проводить испытания карданных передач с исключением перегрева системы торможения, а также обеспечить плавность регулирования тормозного момента, решается тем, что в известном стенде для исследования карданных передач [14] содержатся установленные на основной раме электродвигатель, технологическая передача в виде механической коробки переключения передач, присоединенной к входному валу испытываемой карданной передачи, выходной вал которой присоединен к устройству нагружения через раздаточный редуктор, установленный на дополнительной раме. Согласно предлагаемому нами техническому решению [15], устройство нагружения выполнено в виде гидронасоса, вал которого присоединен к выходному валу раздаточного редуктора, входной канал гидронасоса соединен с гидравлическим баком, а выходной канал соединен со входом регулируемого дросселя, выход которого через теплообменник соединен с гидравлическим баком, причем между выходным каналом гидронасоса и входом дросселя установлены предохранительный клапан и манометр, отградуированный в единицах тормозного момента.

Конструкция предлагаемого стенда для испытаний карданных передач позволяет исключить перегрев системы торможения из-за охлаждения рабочей жидкости, улучшить условия эксплуатации за счет исключения нестабильности тормозного момента с помощью плавного регулирования тормозного момента.

Стенд для испытаний карданных передач (рис. 4, 5) состоит из электродвигателя *1*, выходной конец которого соединен с технологической передачей *2*, соединенной с испытываемой карданной передачей *3*, установленными на основной раме *4*. Выходной вал карданной передачи *3* соединен с входным валом раздаточного редуктора *5*, установленного на дополнительной раме *6*. Устройство нагружения выполнено гидравлическим и представляет собой гидронасос *7*, вал которого присоединен к выходному валу раздаточного редуктора *5*. Входной канал гидронасоса *7*

соединен с гидравлическим баком *8* с рабочей жидкостью, а его выходной канал присоединен к входному каналу дросселя *9*, регулирующему нагрузку. Между дросселем и гидронасосом установлен манометр *10*, отградуированный в единицах тормозного момента, и предохранительный клапан *11* для выпуска избыточного давления в гидравлический бак *8*. Выходной канал дросселя подсоединен к гидравлическому баку через теплообменник *12*.

Стенд работает следующим образом: вращающий момент от электродвигателя *1* передается на испытываемую карданную передачу *3* через технологическую передачу *2*, гидронасос *7* при этом передает испытываемой карданной передаче тормозной момент, создаваемый и регулируемый дросселем *9*, значение тормозного момента определяется с помощью манометра *10*, отградуированного в единицах тормозного момента. При избытке рабочего давления срабатывает предохранительный клапан *11* для предупреждения скачка заданного давления рабочей жидкости в гидравлической системе, который выпускает избыточное давление в гидравлический бак *8*. Теплообменник *12* охлаждает рабочую жидкость.

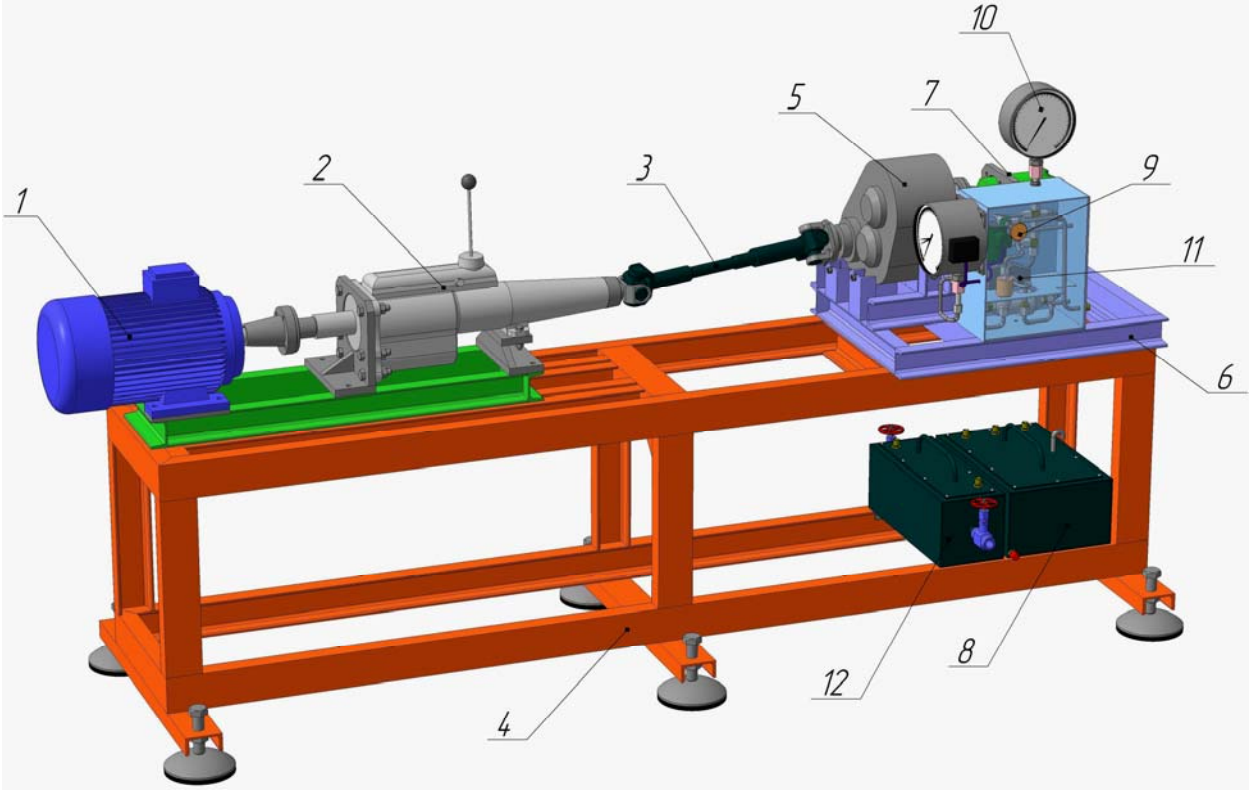


Рис. 4. Стенд для испытания карданных передач
(шланги гидравлической системы не показаны)

Fig. 4. Testing bench for probation of the cardan drive
(hosepipes of hydraulic system are not shown)

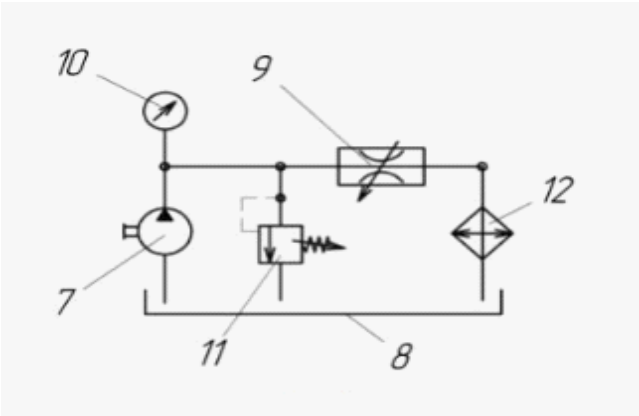


Рис. 5. Гидравлическая схема устройства нагружения

Fig. 5. Hydraulic system of lading facility

Заключение. Таким образом, на основе проведенного анализа известных стендов для испытания карданных передач были решены три задачи: испытания карданных передач в широком диапазоне нагрузок, сравнительные испытания шарниров различных типоразмеров; испытания карданных передач с повышенной точностью настройки угла излома карданной передачи и удобством эксплуатации; испытания карданных передач с исключением перегрева системы торможения, а также обеспечения плавности регулирования тормозного момента.

Предложены три варианта конструкций испытательных стендов. Конструкция первого предложенного стенда позволяет испытывать карданные передачи разных типоразмеров в широком диапазоне нагружающих моментов и скоростей вращения карданных передач [16]. Стенд [14] отличается простотой конструкции, большим диапазоном параметров нагружения и легкостью настройки благодаря наличию рычагов переключения передач на коробке переключения передач и раздаточном редукторе. Конструкция втрого предложенного стенда позволяет испытывать карданные передачи разных типоразмеров в широком диапазоне нагружающих моментов, скоростей вращения и высокой точности настройки угла излома карданной передачи [17]. Стенд [13] отличается простотой конструкции, большим диапазоном параметров нагружения и легкостью настройки благодаря подвижной раме и нониусу, отградуированному в единицах угла излома карданной передачи. Конструкция третьего предложенного стенда позволяет проводить испытания карданных передач, исключая перегрев системы торможения благодаря охлаждению рабочей жидкости, а также повысить качество эксплуатации за счет обеспечения плавности регулирования тормозного момента [18]. Стенд [15] отличается простотой конструкции и системой настройки тормозного момента с помощью регулируемого дросселя и манометра давления рабочей жидкости, отградуированного в единицах тормозного момента.

Библиографические ссылки

1. Меновщиков В. А., Ереско С. П. Исследование и совершенствование игольчатых подшипников карданных передач транспортно-технологических машин / КрасГАУ. Красноярск, 2006. 283 с.

2. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Основные направления развития, улучшения и совершенствования рабочих характеристик карданных передач на игольчатых подшипниках // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 254–256.

3. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско Т. Т. Анализ современных представлений и подходов при исследовании усталостных разрушений игольчатых подшипников // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 287–288.

4. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Малоцикловая усталость игольчатого подшипника // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. : в 2 т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 154–155.

5. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Современное состояние вопроса по исследованию пластического деформирования при статическом контактном нагружении игольчатых подшипников // Механики XXI веку : материалы X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Братск : БрГУ, 2014. С. 37–40.

6. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско Т. Т. Вопросы формирования усталостных трещин в материалах игольчатых подшипников карданных шарниров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы X Всерос. науч.-практ. конф. : в 2 т. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 148–150.

7. Малаховский Я. Э., Иванов Ю. Б. Автомобильные сцепления. Методы испытания автомобилей и его механизмов (НАМИ). М. : Машгиз, 1951. Вып. 1. С. 108.

8. Пат. 61371 Российская Федерация, МПК^7 F 16 D 3/24 (2006.01). Стенд для испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках / Меновщиков В. А., Ереско С. П., Полюшкин Н. Г. № 2006121298/22 ; заяв. 15.06.2006 ; опубл. 27.02.2007.

9. Пат. 2098788 Российская Федерация, МПК^6 G 01 M 13/02. Стенд для испытаний карданных передач / Сигаев А. М., Зданович Б. С. № 96107441 ; заяв. 16.04.1996 ; опубл. 10.12.1997.

10. Пат. 2129710 Российская Федерация, МПК^6 G 01 M 13/02. Стенд для испытания карданных передач / Сигаев А. М., Зданович Б. С. № 96103410/28; заяв. 21.02.1996 ; опубл. 27.04.1999.

11. А. с. 681344 СССР, МКИ^3 G 01M 13/02. Стенд с замкнутым силовым контуром / К. Я. Львовский, В. З. Малаховский, Н. И. Комаров, К. К. Ивлиев. № 2476615/27-11 ; заявл. 14.04.77 ; опубл. 25.08.79, Бюл. № 31. 2 с.

12. А. с. 1569642 СССР, МКИ^3 G 01M 13/02. Стенд для испытаний агреатов трансмиссии транспортных средств / А. И. Смольяков, М. М. Савченко, А. Г. Чернышев, В. Е. Грузинов. № 4409083/25-11 ; заявл. 13.04.88 ; опубл. 07.06.90, Бюл. № 21. 2 с.

13. Пат. 153924 Российская Федерация, МПК^7 G 01 M 13/02 (2006.01). Стенд для испытаний карданных передач / Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. № 2014147821/28 ; заяв. 26.11.2014 ; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. 2 с.

14. Пат. 149002 Российская Федерация, МПК^7 G 01 M 13/02 (2006.01). Стенд для испытаний карданных передач / Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско С. П., Ереско Т. Т. № 2014120845 ; заяв. 22.05.2014 ; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35. 1 с.

15. Пат. 162876 Российская Федерация, МПК^7 G 01 M 13/02 (2006.01). Стенд для испытаний карданных передач / Ереско С. П., Ереско А. С., Ереско Т. Т., Ереско В. С., Кукушкин Е. В., Стручков А. В., Хоменко И. И. № 2015157365 ; заяв. 30.12.2015 ; опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18. 2 с.

16. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско Т. Т. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 337–339.

17. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках в широком диапазоне размеров с изменением угла излома карданной передачи / Е. В. Кукушкин [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 2. С. 58–73. DOI: 10.15593/24111678/2016.02.05.

18. Расчет гидравлической системы тормозного устройства стенда для испытания трансмиссий транспортно-технологических машин / А. С. Ереско [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 4. С. 60–79. DOI: 10.15593/24111678/2016.04.06.

References

1. Menovshchikov V. A., Eresko S. P. *Issledovanie i sovershenstvovanie igol'chatykh podshipnikov kardannykh peredach transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Study and improvement of needle bearing universal joint transmission of transport and technological machines]. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2006, 283 p.

2. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [Main directions of development, improve and perfect the performance driveline on needle bearings]. *Materialy XVI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2012, P. 254–256 (In Russ.).

3. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko T. T. [The analysis of modern concepts and approaches in the study of fatigue failures of needle bearings]. *Materialy XVII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013, P. 287–288 (In Russ.).

4. Kuk Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [Low Cycle Fatigue needle bearing]. *Materialy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials IX Intern. Scientific. Conf "Current issues of aviation and cosmonautics"]. Krasnoyarsk, 2013, P. 154–155 (In Russ.).

5. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [Current status of the issue on the study of plastic deformation under static loading, the contact needle roller bearings]. *Materialy X Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Mekhaniki XXI veku"* [Materials X Russian international participation scientific conference "Mechanics of XXI century"]. Bratsk, Bratsk State University, 2014, P. 37–40 (In Russ.).

6. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko T. T. [Questions of formation of fatigue cracks in materials needle bearing universal joints]. Ma*terialy X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Materials X Intern. Scientific. Conf "Current issues of aviation and cosmonautics"]. Krasnoyarsk, 2014, P. 148–150 (In Russ.).

7. Malahovskij Ya. E., Ivavnov Y. B. [Motor-car coupling. Methods of test of cars and his mechanisms]. Moscow, Mashgiz Publ., No. 1, 1951, P. 108.

8. Menovshchikov V. A., Eresko S. P., Polyushkin N. G. *Stend dlya ispytaniy kardannykh sharnirov na igol'chatykh podshipnikakh*. [Stand for universal joints test on needle bearings]. Patent RF, no. 61371, 2007.

9. Sigaev A. M., Zdanovich B. S. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach* [Stand for the tests of universal joint transmissions]. Patent RF, no. 2098788, 1997.

10. Sigaev A. M., Zdanovich B. S. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach* [Stand for the tests of universal joint transmissions]. Patent RF, no. 2129710, 1999.

11. Lvovskii K. Y., Malahovskiy V. Z., Komarov N. I., Ivliev K. K. *Stend s zamknutym silovym konturom* [Stand with closed loop power]. Patent USSR, no 681344, 1977.

12. Smolakov A. I., Savchenko M. M., Chernishev A. G., Gruzinov V. E. *Stend dlya ispytaniy agreatov transmissii transportnykh sredstv* [Stand for the tests of aggregates of transmission of transport vehicles]. Patent USSR, no. 1569642, 1990.

13. Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach* [The test stand driveline]. Patent RF, no. 153924, 2015.

14. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko S. P., Eresko T. T. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach* [The test stand driveline]. Patent RF, no. 149002, 2014.

15. Eresko S. P., Eresko A. S., Eresko T. T., Eresko V. S., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Struchkov A. V., Khomenko I. I. *Stend dlya ispytaniya kardannykh peredach* [The test stand driveline]. Patent RF, no. 162876, 2016.

16. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko T. T. [Booth design for testing universal joints with needle bearings]. *Materialy XIX mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2015, P. 337–339 (In Russ.).

17. Kukushkin E. V., Eresko S. P., Eresko T. T., Menovshchikov V. A., Orlov A. A. [Stand construction for testing the universal joint on needle bearings in wide range of sizes with the angle changing driveline]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya.* 2016, No. 2, P. 58–73. DOI: 10.15593/24111678/2016.02.05 (In Russ.).

18. Eresko A. S., Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Orlov A. A. [Calculation of the hydraulic system of brake device of stand for the test of transmissions of transport-technological machines]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2016, No. 4, P. 60–79. DOI: 10.15593/24111678/2016.04.06 (In Russ.).

© Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Михеев А. Е., 2017

UDC 531.383

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 910–917

THE STUDY OF THE ENGINE-FLYWHEEL HOUSING MADE BY ADDITIVE TECHNOLOGY

D. V. Ermakov

JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus"
56в, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
E-mail: info@polus-tomsk.ru

The first commercial equipment for additive technology production with 3D-printing was made more than 30 years ago.

In the mid 90-ies 3D-printing was used mainly in research activities. The wide spread of digital technology in the field of design, modeling, calculations and machining stimulated a rapid development of additive technology.

To evaluate the application of the parts printed on a 3D-printer, there was conducted a research of the design of the reaction wheels engines. On the basis of the pre-designed 3D-model there were made two housings of powder materials – alloys АК9Ч and AlSi10Mg were constructed. The analysis of the stability of the geometry of the engine housings to thermal effects, susceptibility to mechanical loads in the model layout of the engine-flywheel was conducted. Outgassing in vacuum was defined and the microstructure of additively manufactured materials was researched.

Test results proved the possibility of application of the additively manufactured housing made of selected alloys with sufficient mechanical strength in the composition of the engine-flywheel.

There is obviously a need to continue the studies on the properties of materials used in additive technologies in order to compile a list of materials with their properties and application characteristics in the design of the engine-flywheel.

Keywords: additive technology, post processing, detail, engine-flywheel, mechanical load, outgassing.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 910–917

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРПУСА ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Д. В. Ермаков

АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
E-mail: info@polus-tomsk.ru

Первые коммерческие разработки оборудования, позволяющего изготавливать изделия по аддитивной технологии методами 3D-печати, появились более 30 лет назад.

Еще в середине 90-х годов трехмерная печать использовалась главным образом в научно-исследовательской деятельности. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования, моделирования расчетов и механообработки стимулировало взрывной характер развития аддитивной технологии.

Для оценки применения деталей, напечатанных на 3D-принтере, в конструкции двигателей-маховиков проведена исследовательская работа. По предварительно спроектированной 3D-модели изготовлены два корпуса из порошковых материалов – сплавов АК9Ч и AlSi10Mg. Проведен анализ стойкости геометрии корпусов к температурным воздействиям, восприимчивости к механическим нагрузкам в составе макета двигателя-маховика, определено газовыделение в условиях вакуума, исследована микроструктура аддитивно полученных материалов.

По результатам испытаний сделано заключение о возможности применения 3D-корпусов из выбранных сплавов с достаточной механической прочностью в составе прибора. Сделан вывод о необходимости дальнейшего изучения свойств материалов, применяемых в аддитивной технологии, для составления перечня материалов с указанием их свойств и особенностей применения в конструкции двигателей-маховиков.

Ключевые слова: аддитивная технология, постобработка, деталь, двигатель-маховик, механическая нагрузка, газовыделение.

Introduction. The object of the study is an additive technology, used in the manufacture of engine-flywheels parts for the systems of orientation and stabilization of spacecrafts. The subject of research is additively manufactured engine housings made of Russian powder material АК9Ч and its foreign counterpart AlSi10Mg [1–4].

Work description. On the basis of pre-designed 3D-model two housings were made on 3-D printer of alloys АК9Ч and AlSi10Mg (fig. 1). Casual housing is made of aluminium rolling brand AMg6 GOST 21488–97.

To evaluate the performance of the studied housings the following program of works was composed:

– mechanical processing on accordance to the drawing;

– control of dimensions according to the drawing;

– check of gassing in accordance with the requirements of the materials used in engine-flywheels, GOST R 50109–92;

– the impact of temperature of +60 and –60 °C;

– control dimensional stability on accordance to the drawing;

– analysis of the microstructure of the alloys;

– testing the mechanical strength of the housing with the installed load, simulating the weight of the electronics and the electric motor.

The results of the tests should show whether the housings possess the sufficient mechanical strength, resistance to temperature changes; the value of outgassing in vacuum also must be determined.

It should be noted that the housings were printed at different angles to the main setting surface adjacent to the spacecraft (fig. 2). This is reflected in the amount of required technological support (the support surface for forming planes that are in suspended state), and subsequently on the post-processing of the case.

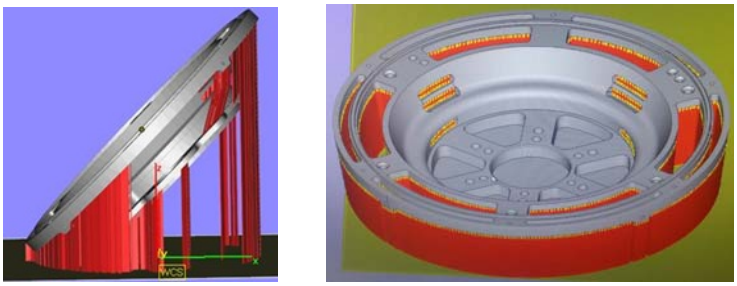
Support of the housing of the alloy AlSi10Mg was insignificant; it was removed using the special machining tool (fig. 3) [5; 6]. Then the body was subjected to sandblast treatment, which completed the process of rough post-processing, and then machined using universal equipment to conform to the drawing.

Due to the massive support of the housing from the alloy АК9Ч from the beginning were used the universal machines for removal. This made it possible to combine the removal of the support (fig. 4) and machining of surfaces to meet the requirements of the drawing, which ultimately reduced the production cycle of the housing.

a *b* *c*

Fig. 1. 3D model of engine housing (*a*), printed housings made of alloys АК9Ч (*b*) and AlSi10Mg (*c*)

Рис. 1. 3D-модель корпуса (*а*), напечатанные корпуса из сплавов АК9Ч (*б*) и AlSi10Mg (*в*)



a *b*

Fig. 2. 3D model of engine housing made of alloys АК9Ч (*a*) and AlSi10Mg (*b*) with the support surface

Рис. 2. 3D-модель корпусов из сплавов AlSi10Mg (*а*) и АК9Ч (*б*) с поддержкой

Fig. 3. Special machining tool for removing the support of the housing made of the alloy AlSi10Mg

Рис. 3. Инструмент для удаления поддержки корпуса из сплава AlSi10Mg

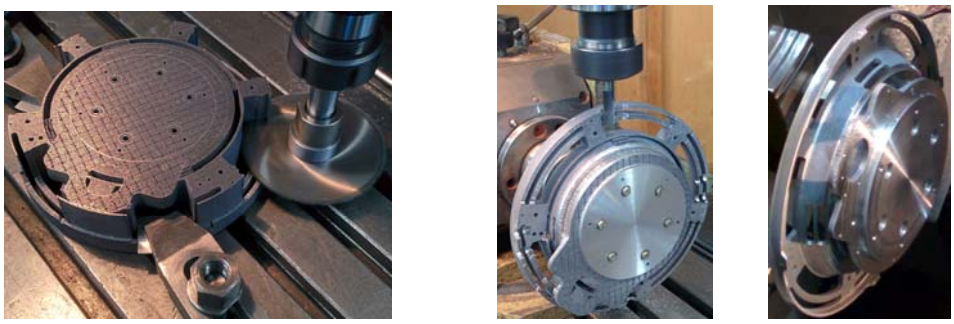


Fig. 4. Housing from the alloy АК9Ч at the stage of support removal

Рис. 4. Корпус из сплава АК9Ч в процессе снятия поддержки

After removing the support and monitoring of the geometry of housings for compliance with the drawing the surfaces not subjected to post-processing were measured. All dimensions meet the drawing, which indicates repeatability of the geometry of engine housings in 3D printing.

Thus, we can conclude: the manufacture of details of precision mechanics by means of additive technologies requires a minimal of finishing post-processing. Therefore, when creating 3D models in CAD, you must set allowances taking into account the subsequent mechanical surface treatment to the required dimensions and choose the optimal variant of the support when printing on a 3D printer [7; 8].

To reduce the impact of increased gassing in vacuum conditions from the materials that are sensitive to the influence of its own external atmosphere, in the design of engines-flywheels must be used the materials that in accordance with GOST R 50109–92 have total mass loss of not more than 1 % and the content of volatile condensable substances is not more than 0.1 %, and the residual outgassing in the vacuum pressure chamber of engine-flywheel, where the low pressure is supported.

The residual outgassing in vacuum chamber was defined at the low pressure $1.33 \cdot 10^{-1}$–$1.33 \cdot 10^{-2}$ Pa (10^{-3}–10^{-4} mmHg) and the temperature (80 ± 3) ºC during 48 hours and in accordance with GOST R 50109–92.

The residual outgassing in vacuum chamber is calculated:

$$\Delta P = P_з - P_п,$$

where $P_з$ – is the pressure in a loaded chamber, Pa; $P_п$ – is the pressure in an unloaded chamber, Pa.

Then it comes to the volume V_2 =1 l using the formula:

$$P_2 = \Delta P V_1 / V_2 ,$$

where P_2 – given volume in the finished item, Pa; V_1 – chamber volume, l; V_2 – volume of the finished item, l.

The results of outgassing are supplied at tab. 1 and 2.

Table 1

The residual outgassing in vacuum chamber

Housing material	data
AMg6	0.25
АК9Ч	0.48
AlSi10Mg	0.90

Housings made by additive technology meet the requirements for outgassing for the materials used in the construction of engines-flywheels of non-hermetic character in the construction of the spacecraft.

Table 2

Outgassing in accordance with GOST R 50109–92

Housing material	Mass loss, %	Condensing volatiles, %
AMg6	0.0	0.0
АК9Ч	0.0	0.0
AlSi10Mg	0.0	0.0

After the control of outgassing the housings were subjected to temperature exposure +60 and –60 °C (three cycles). The dwell time at each temperature was 2 hours, excluding the time of its setting.

Control of the geometry of the housings after these exposures showed no deviation relative to initial values. Consequently, the housings have sufficient vitality to temperature effects and can be recommended for the usage in the construction of the engines-flywheels of the spacecrafts.

Analysis of the microstructure of the alloys showed that it is mainly a mixture of aluminium and silicon. However, on the photographs of the microstructure the grains of primary aluminum, crystallizing in the first hypoeutectic alloys are not clearly observed [9]. While the silicon inclusions have predominantly spherical shape in comparison with the conventional lamellar cast structure (fig. 5). The hardness of the housings made of alloys system Al–Si has the extremely high value (HB 110 in the initial state and HB 107 after annealing at temperature 320 ºC). Possible reasons for these differences lie in non-equilibrium conditions of crystallization and cooling, which are the feature of additive technologies.

The results of the preliminary calculation. Before the full-scale tests of the layout model of the engine-flywheel on a vibration stand the model with the defined parameters of the studied housings with mounted loads, simulating the weight of the electric motor *1* and controlling electronics *2* for mechanical calculation was prepared (fig. 6) [10; 11].

When designing the mathematical model the mechanical properties of the materials of the housings were taken the same as the alloys AlSi10Mg and АК9Ч are interchangeable.

As the joints of details was selected the global contact, in the result while constructing the final elemental model we obtained a joint mesh (fig. 7) [12; 13]. Mount housing

set by the parameter “fixed geometry” for main setting surface.

The results of a modal analysis of the housings confirmed the absence of resonant frequencies below 100 Hz, which meets the general requirements for the design of engine-flywheels. The first resonant frequency of the model is 476.64 Hz.

Analysis of the response of housings to random broadband vibration (RBV) conducted to determine their resistance to external influence and identify areas of maximum stress concentration. The study was performed along three mutually perpendicular axes: in the direction perpendicular to the setting plane (along axis *OZ*) and in directions parallel to it (along the axes *OX* and *OY*).

The loads were selected from the condition of passing the preliminary and qualification of the engine-flywheels.

For comparison, tab. 3 shows the safety factors of the housings made of АК9Ч and AlSi10Mg alloys and a standard housing of AMg6 alloy.

The results of full-scale tests. After performing the preliminary calculations of the layout model we produced simulators of the electric motors and service electronics (fig. 8) for installation on a 3D body.

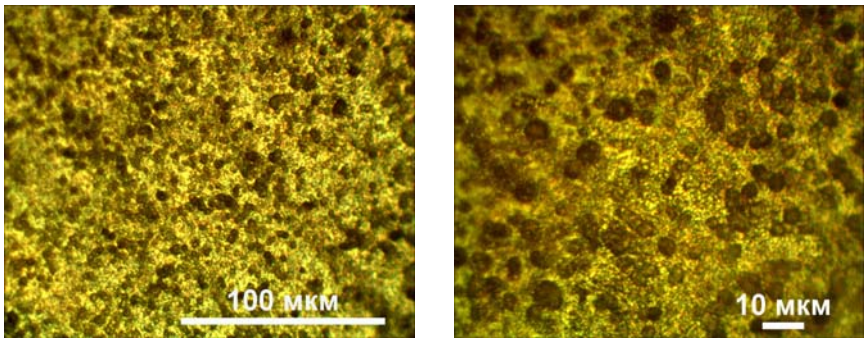


Fig. 5. Microstructure of alloys system Al–Si made by 3D-printing

Рис. 5. Микроструктура сплавов системы Al–Si, полученных 3D-печатью

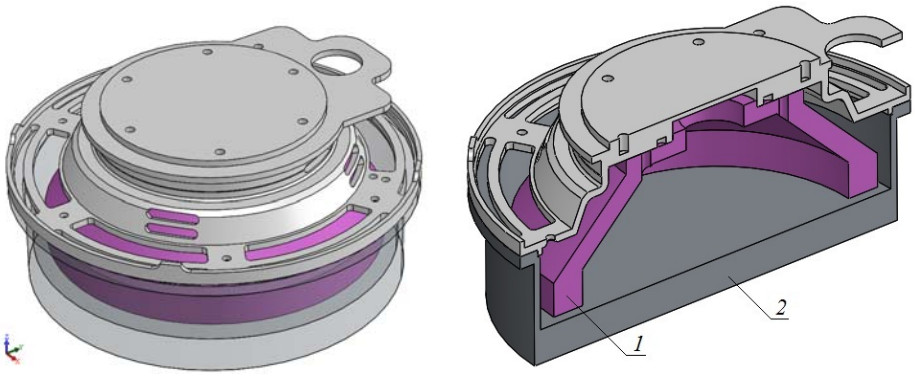


Fig. 6. Analyzed 3D-model

Рис. 6. Расчетная 3D-модель

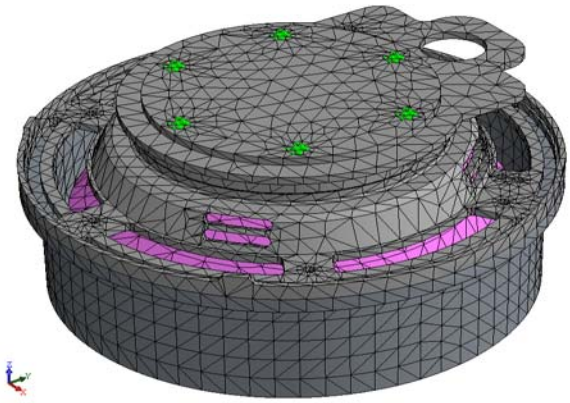


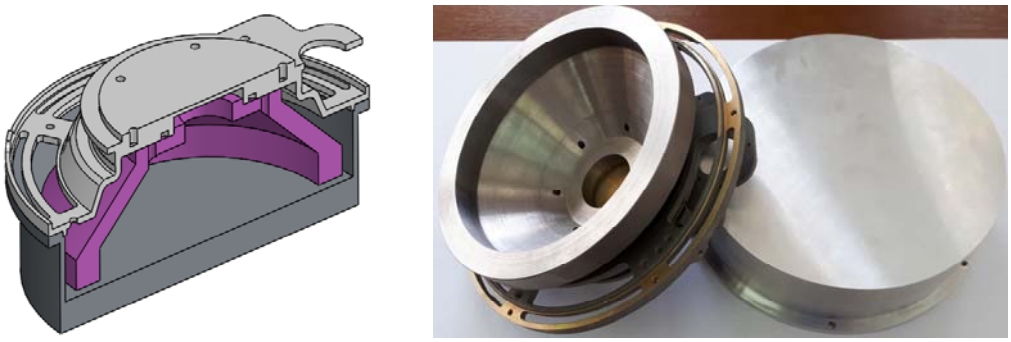
Fig. 7. Finite-element 3D-model

Рис. 7. Конечно-элементная 3D-модель

Table 3

The calculated values of the safety factors

The mean quadratic value of acceleration, g	The direction of action	Material	The reserve coefficient $K_з$	
			on yield stress	on strength limit
17	along axis *OZ*	АК9Ч/ AlSi10Mg	1.27	1.25
		AMg6	2.49	3.32
	along axis *OX*	АК9Ч/ AlSi10Mg	1.01	0.99
		AMг6	2.0	2.68
	along axis *OY*	АК9Ч/ AlSi10Mg	0.99	0.97
		AMg6	1.98	2.64
12	along axis *OZ*	АК9Ч/ AlSi10Mg	1.89	1.85
		AMg6	3.51	4.7
	along axis *OX*	АК9Ч/ AlSi10Mg	1.58	1.55
		AMг6	3.12	4.15
	along axis *OY*	АК9Ч/ AlSi10Mg	1.4	1.37
		AMg6	3.03	4.04



a *b*

Fig. 8. 3D-model (*a*) and layout model for mechanical testing (*b*)

Рис. 8. 3D-модель (*а*) и макет для механических испытаний (*б*)

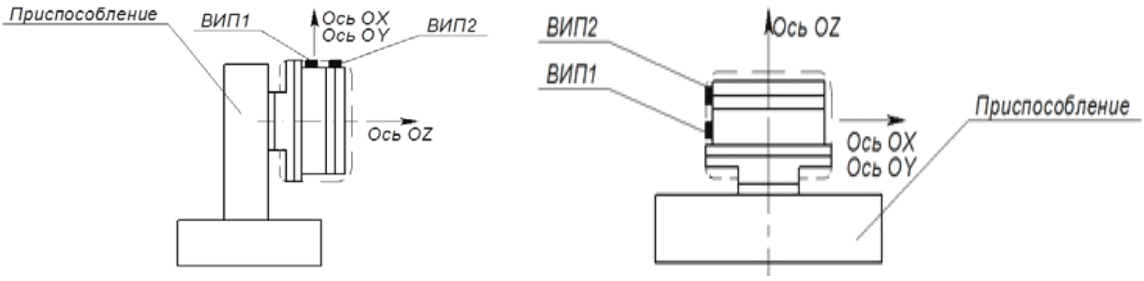
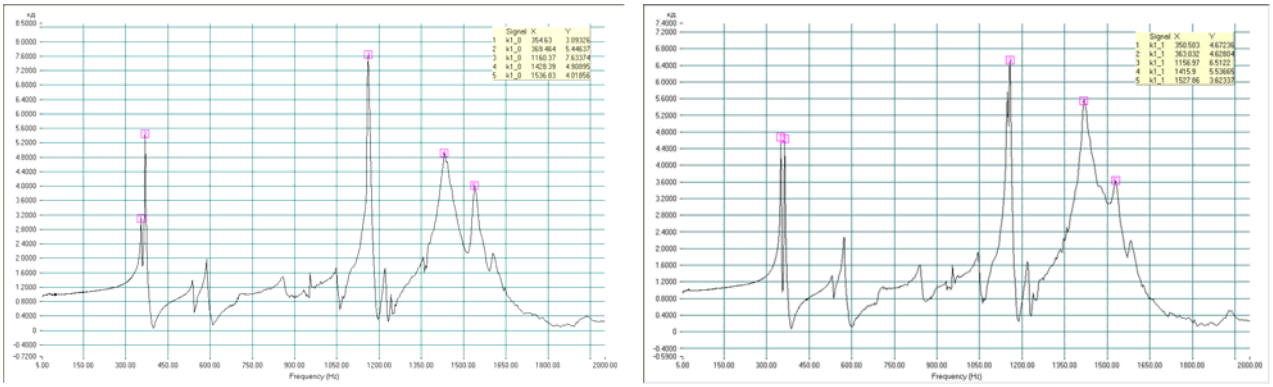


Fig. 9. The scheme of installed on the layout sensors

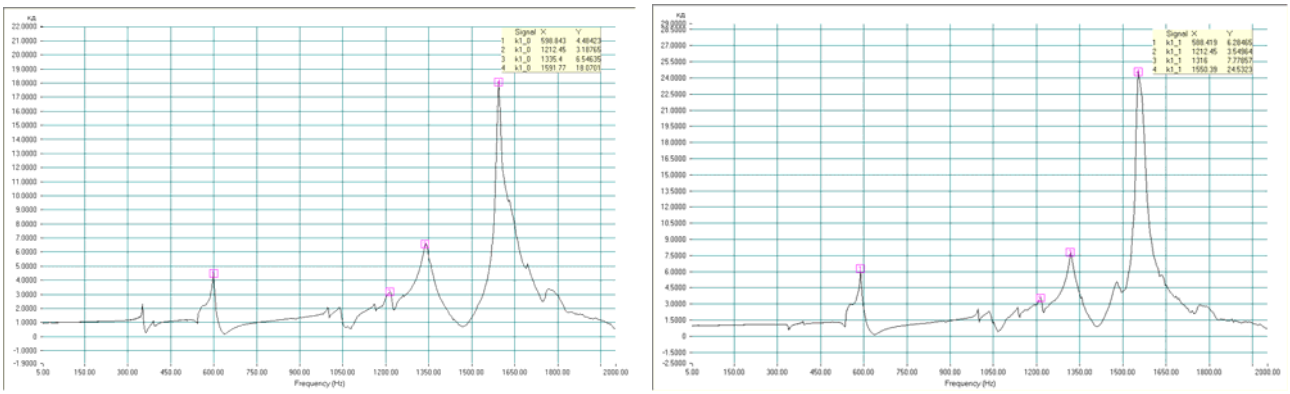
Рис. 9. Схема установки датчиков на макете



a *b*

Fig. 10. Search results of resonances along the axis *OX*
before the vibration effect (*a*); after the vibration effect (*b*)

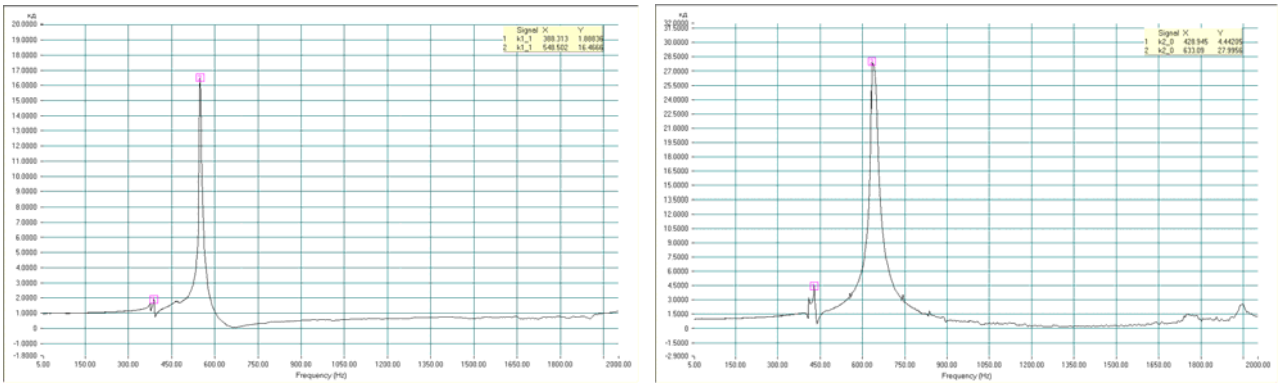
Рис. 10. Результаты поиска резонансов вдоль оси *OX*
до воздействия вибрации (*а*); после воздействия (*б*)



a *b*

Fig. 11. Search results of resonances along the axis *OY*
before the vibration effect (*a*); after the vibration effect (*b*)

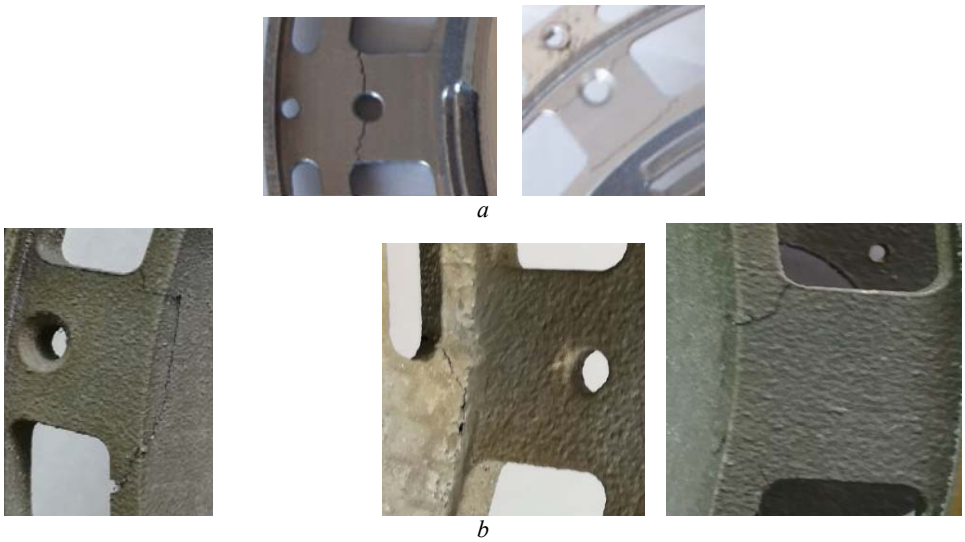
Рис. 11. Результаты поиска резонансов вдоль оси *OY*
до воздействия вибрации (*а*); после воздействия (*б*)



a *b*

Fig. 12. Search results of resonances along the axis *OZ*
before the vibration effect (*a*); after the vibration effect (*b*)

Рис. 12. Результаты поиска резонансов вдоль оси *OZ*
до воздействия вибрации (*а*); после воздействия (*б*)



a

b

Fig. 13. Damages of housings made of АК9Ч (*a*) and AlSi10Mg alloys (*b*)

Рис. 13. Повреждения корпусов из сплавов АК9Ч (*а*) и AlSi10Mg (*б*)

The full-scale tests on the response of housings to random broadband vibration (RBV) were carried out in two stages according to the requirements for acceptance and qualification testing.

The tests were carried out alternately in each of three mutually perpendicular directions with the installed on the model sensors (fig. 9) in the following order [14; 15]:

– search for resonant frequencies of structural elements;

– loading of random broadband vibration (RBV);

– search for resonant frequencies of structural elements.

The results of full-scale tests on the axes of the model at the stage of preliminary tests are presented on graphs (fig. 10–12).

The full-scale tests on the response of housings to random broadband vibration (RBV) during the qualification tests confirmed the results of the preliminary mechanical analysis of the mathematical model: housings made of АК9Ч and AlSi10Mg alloys are unstable to the selected load values, and will deform in the most loaded areas (fig. 13).

The check of the full-scale model on a vibration stand not only showed the adequacy of the preliminary analysis of a mathematical model but also proved the correctness of the choice of properties of additively manufactured materials that is proved by the nature of the deformation on the housings.

Conclusion. The porosity between the printed layers is higher than in one layer of rolling. This should be considered when choosing the location of the workpiece in the print chamber. The content of pores is less than 1 % in the transverse and longitudinal directions and the pores are about the same size and geometry, which demonstrates the high quality of the sintering.

Housings made of АК9Ч and AlSi10Mg alloys by means of additive technology can be recommended for use in the construction of the engine-flywheels of unpressurized form while reducing the demands of the susceptibility of the structure to mechanical loads.

However, having chosen an alloy that meets the requirements for materials used in the design of the engine-flywheels; it is possible to use additive technology for manufacturing the parts without the reduction of these requirements. So, when adding titanium carbide in the alloys of the studied housings, the reserve coefficient is increased in 1.5–2 times.

Thus, the samples obtained by laser sintering can be used for the manufacture of parts while maintaining properties similar to the properties of their prototypes, made by means of traditional technology.

There is obviously a need to continue the studies on the properties of materials used in additive technologies in order to compile a list of materials with their properties and application characteristics in the design of the engine-flywheel construction.

References

1. Official site of Boeing company. Available at: http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page (accessed: 06.10.16).

2. Official site of SpaseX company. Available at: http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3D printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed (accessed: 06.10.16).

3. Balyakin A. V., Smelov V. G., Chempinskiy L. A. [Additive technology application details of combustion]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2012, No. 3 (34), P. 458.

4. Samara University scientists for the first time “printed” on a 3D printer the combustion chamber of a gas turbine engine. Available at: http://www.ssau.ru/news/ 12978-Uchenye-Samarskogo-universiteta-vpervye-napechatali-na-3Dprintere-kameru-sgoraniya-gazoturbinnogo-dvigatelya/ (accessed: 06.10.16).

5. Lysych M. N., Shabanov M. L., Romanov V. V. [Sphere of technologies 3D printing]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014, No. 12, P. 345.

6. Tokarev B. E., Tokarev R. B. [Technology analysis of 3D printing market: two years later]. Naukovedenie. 2016, Vol. 8, No. 1. DOI: 10.15862/28EVN116.

7. Merkin D. R. *Giroskopicheskie sistemy* [Gyroscopic systems]. Moscow, Phizmatgiz, Nauka Publ., 1974, 356 p.

8. Ishlinskij A. J. *Mehanika giroskopicheskih system* [Mechanics of gyroscopic systems]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, 327 p.

9. Ticshenko O. F. *Elementy pribornyh ustrojstv* [Element of instrument devices]. Moscow, Vycshaja shkola Publ., 1978, 384 p.

10. Afanasev V. A. *Eksperimentalnaya otrabotka letatelnich apparatov* (The experimental testing of aircraft). Moscow, MAI Publ., 1994, P. 3.

11. Egorov Y. P., Lozinskii Y. M., Hvorova I. A. *Materialovedenie.* Tomsk, Tomskii politechniheskii universitet. Publ., 2009. 219 p.

12. Pervickij J. D. *Raschet i konstruirovanie tochnyh mehanizmov* [Calculation and design exact machinery]. Moscow, Vycshaya shkola Publ., 1976, 456 p.

13. Birger I. A., Shorr B. A., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost' detaley machin* [Calculations details of machines on durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 702 p.

14. Perchanok B. H. *Ustranenie vibratsii elektricheskikh mashin* [Elimination of vibration in electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1979, 200 p.

15. Shubov I. G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Din and vibration of electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1973, 259 p.

Библиографические ссылки

1. Официальный сайт компании Boeing [Электронный ресурс]. URL: http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page (дата обращения: 06.10.16).

2. Официальный сайт компании SpaseX [Электронный ресурс]. URL: http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3Dprinted-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed (дата обращения: 06.10.16).

3. Балякин А. В., Смелов В. Г., Чемпинский Л. А. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // Вестник Самар. гос. аэрокосмич. ун-та. 2012. № 3 (34). С. 458.

4. Ученые Самарского университета впервые «напечатали» на 3D-принтере камеру сгорания газотурбинного двигателя : офиц. сайт НИ СГАУ [Электронный ресурс]. URL: http://www.ssau.ru/news/12978-Uchenye-Samarskogo-universiteta-vpervye-napechatali-na-3Dprintere-kameru-sgoraniya-gazoturbinnogo-dvigatelya/ (дата обращения: 06.10.16).

5. Лысыч М. Н., Шабанов М. Л., Романов В. В. Области применения технологий 3D-печати // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 12. С. 345.

6. Токарев Б. Е., Токарев Р. Б. Анализ технологий рынка 3D-печати: два года спустя // Науковедение : интернет-журнал. 2016. Т. 8, № 1. DOI: 10.15862/28EVN116 (дата обращения: 06.10.16).

7. Меркин Д. Р. Гироскопические системы. М. : Физматгиз : Наука, 1974. 356 с.

8. Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем. М. : Изд-во АН СССР, 1963. 327 с.

9. Тищенко О. Ф. Элементы приборных устройств. М. : Высш. шк., 1978. 384 с.

10. Афанасьев В. А. Экспериментальная отработка летательных аппаратов. М. : МАИ, 1994. 345 с.

11. Егоров Ю. П., Лозинский Ю. М., Хворова И. А. Материаловедение : учеб. пособие. 3-е изд. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. 219 с.

12. Первицкий Ю. Д. Расчет и конструирование точных механизмов. М. : Высш. шк., 1976. 456 с.

13. Биргер И. А., Шорр Б. А., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин : справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.

14. Исаакович М. М., Клейман Л. И., Перчанок Б. Х. Устранение вибрации электрических машин. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 200 с.

15. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергия, 1973. 259 с.

© Ermakov D. V., 2017

UDC 531.383

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 918–924

BALANCING SMALL ENGINES-FLYWHEELS

D. V. Ermakov, V. V. Solovev

JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus"
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
E-mail: info@polus-tomsk.ru

When you create a small spacecraft there is the problem of redressing the imbalance of the rotor-flywheel of the small engine flywheel with the selection of weights, while the mechanical contact method leads to elastic deformation in the supports of rotation, which has a negative impact on their work especially at high speeds of rotation of the flywheel.

From this perspective, there is a need to study other ways of balancing of rotors, flywheels, namely contactless balancing of rotor of flywheels with the help of concentrated energy fluxes of laser and electron-beam evaporation of the metal.

The technology of balancing with an electron beam has a number of advantages over the laser technology of balancing for the realization of balancing of rotors of flywheels. For example, it is possible to implement the process of redressing of imbalance in the vacuum that brings the balancing conditions to real operating conditions. Also the reflectance of energy in the processing of electron beam is much lower than during laser processing, which demonstrates the efficiency of the process.

The dependences of the intensity of evaporation from the settings of the laser and electron beam are defined.

Contactless balancing of rotors of flywheels with the help of concentrated energy fluxes evaporation of metal is currently possible, but it is necessary to have special equipment with the required capacity of operation.

Keywords: engine-flywheel, balancing, laser, electron beam.

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 918–924

БАЛАНСИРОВКА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ

Д. В. Ермаков, В. В. Соловьев

АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
E-mail: info@polus-tomsk.ru

При создании малых космических аппаратов возникает проблема устранения дисбаланса ротора-маховика в малоразмерном двигателе-маховике. Использование подбора грузов ограничено их массой, а механический контактный способ (высверливание отверстий) приводит к возникновению упругой деформации в опорах вращения, что отрицательно сказывается на их работе (особенно на больших частотах вращения маховика).

Исходя из этого, необходимо исследовать другие способы, в частности, бесконтактную балансировку роторов-маховиков с помощью концентрированных потоков энергии, лазерное и электронно-лучевое испарение металла.

Технология балансировки электронным лучом обладает рядом преимуществ перед лазерной: коэффициент отражения энергии при обработке электронным лучом значительно ниже, чем при обработке лазером, энергоэффективность процесса выше, устранение дисбаланса выполняется в вакууме, что приближает условия балансировки к реальным рабочим.

Установлены зависимости интенсивности испарения от параметров режима лазера и электронного луча.

Бесконтактная балансировка роторов-маховиков с помощью концентрированных потоков энергии испарения металла в настоящее время возможна, но необходимо иметь специальное оборудование с требуемой мощностью работы.

Ключевые слова: двигатель-маховик, балансировка, лазер, электронный луч.

Introduction. A number of problems arises during manufacturing of an engine-flywheel. One of them is imbalance of a rotor of a flywheel that leads to vibrations. There are 2 methods of redressing of imbalance in instrument engineering: the mechanical one (metal removal, fig. 1, *a*) and selection of weights – balancing screws (adding of mass, fig. 1, *b*).

During the process of metal removing mechanical pressure on the bearing unit appears through a flywheel rim and arms. Under emerging stress elastic deformation

occurs in the bearing unit that causes displacement of the rolling elements (balls) from their raceways. When exceeding the admissible load elastic deformation moves to the stage of irrecoverable deformation that leads to hidden defects in the bearing unit.

While balancing the rotor of the flywheel with screws they make several bores equidistantly located on the girth of the rotor rim, where they place screws of certain mass. However, this method of balancing has some problems caused by small size of the rim itself and is limited with technological capabilities to produce screws and screw holes. Those screw holes in the rim of the flywheel reduce its total mass that leads to increase of mass in the other places of the rotor system that makes the required moment of inertia secure kinetic moment of the flywheel. In designing the structure of the engine-flywheel that increases its weight and size [1–3].

Both methods of implementation of above-mentioned balancing are labour-intensive, demand high skills of performer and expensive cutting tools and equipment and special arming for each appliance.

While using small engines-flywheels the problem of balance correction of the rotor of the flywheel because of its small measures and other peculiar features.

Due to this fact the need to study different methods of balancing of rotors of flywheels appeared, namely the method of contactless balancing with the help of concentrated energy flows in laser and cathode-ray metal evaporation [4].

The cathode-ray balancing technology has several advantages over the laser one. For example, the process of imbalance redressing takes place in vacuum that creates almost-real life operating conditions of engine-flywheels. The energy reflection coefficient when the electronic beam is used is much lower than when we use lasers. So the former technology appears to be more energy efficient than the latter one. The cathode-ray technology has an advantage of lower price as well, for example, having the power of 12 kW it is the third of a price of laser technology complex. The other drawback of laser technology is that the material of flywheel rotors would react with gases of air during heating and melting. Consequently, we have to create protective atmosphere in a work volume [5; 6].

To balance the flywheel rotor using concentrated energy flows the following tasks were set up:

– the study of dependence of evaporation on characteristics of laser and electronic beam action;

– receiving data of changes in metal structure in the area of local weld penetration;

– defining the possibility of balancing flywheel rotors by means of concentrated energy flows.

Defining the optimal regime through experiments. The process of evaporation was carried out with a fine-focused electronic beam and a laser on samples, made of steel 30X13H2CM, that is used in production of flywheels.

During the experiment the distance between samples and focusing system, the beam current, the number and duration of impulses were modified [7–9].

Before the experiment the samples were weighed up on laboratory scales with a precision of 1 mg. After each stage of the process they were weighed up again, this way an amount of removed material was determined.

Necessary characteristics were calculated according the following formulas:

– power flow density

$$P = \frac{P_{\text{п}}}{S_{\text{п}}},$$

where $P_{\text{п}}$ is beam power; $S_{\text{п}}$ is beam area on the surface of the sample;

– evaporation rate

$$V_{ev} = \frac{m}{tS_{\text{п}}},$$

where m is mass of evaporated material; t is impulse duration.

The experiment studied the influence of the distance between the irradiated sample and focusing system of electronic beam. Concentration of electrons in the beam depends on a focus distance. If the distance is long while vacuum is not deep enough (less than 10^{-1} Pa) than electrons would lose energy and change direction of movement because of dispersion in particles of environment, therefore, the impact on the material surface would be less efficient (fig. 2).

a *b*

Fig. 1. Balancing the rotor-flywheel:
a – removing the metal on the rim of the flywheel; *b* – balancing with screws

Рис. 1. Балансировка ротора-маховика:
а – удаление металла на ободе маховика; *б* – балансировка винтами

The maximum evaporation occurs when the distance is 20–25 sm. If to increase or to decrease the distance to the focusing system then the beam diameter increases and it becomes less concentrated as well as the process of treatment becomes less efficient. The higher the concentration of electrons is, the more intense the metal removal is.

All the further experiments were carried out at the estimated distance of 20–21 cm to the focusing system. It corresponds the beam diameter of 250 μm under 50 mA and accelerating voltage of 30 kV.

To define the possibility of evaporation it is needed to set the laser and electronic beam at minimum power.

Due to the studies it is known that the minimal current value of the beam allowing evaporation is 35 mA, while the maximal one is 52 mA. There is no reason to use current of greater power because of unfavorable effects, such as explosive melt ejection, overheat of processed material.

The duration of impulses also had limits (fig. 3, 4). The maximal was 1000 ms for it is a threshold value for the used installation. The minimal is 100 ms, because at lower values the energy of electrons is spent on their runaway as a result of surface reflection, the sample warms up slightly, but the material removal does not happen [10].

Fig. 4 shows us that the mass of the metal evaporated from the surface of the sample with laser is very small. That is why we take the cathode-ray method as the basis of studying possibilities of balancing rotors of flywheels.

When metal is treated with electronic beam, the process of evaporation depends greatly on the impulse duration. The longer duration is, the more metal is removed, because much more energy affects the sample. In this case energy spreads far beyond the processed area due to its thermal conductivity. It makes structural changes of the metal. The long impulse duration leads to appearance of vapours of processed material over the sample surface that causes waste of the beam energy [11; 12].

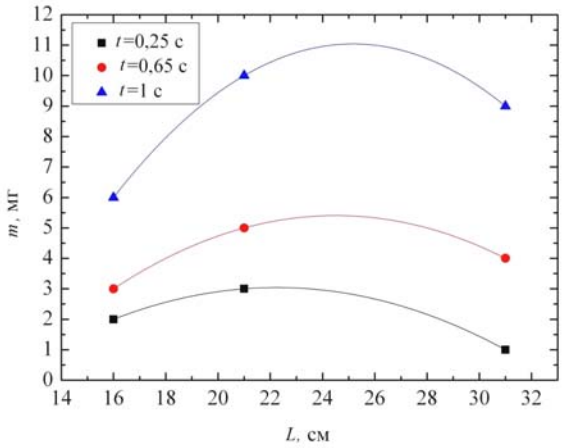


Fig. 2. Dependence of the mass of the vaporized metal on the distance to the focusing system at a beam current I = 52 mA

Рис. 2. Зависимость массы испаренного металла от расстояния до фокусирующей системы при токе луча I = 52 мА

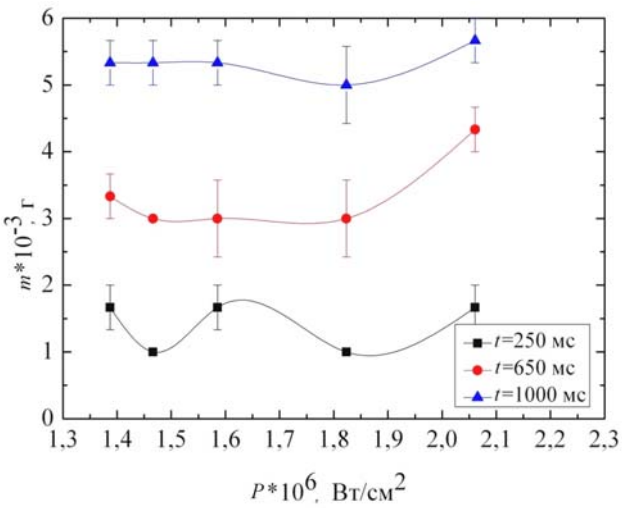


Fig. 3. Dependence of the mass of the material removed on the electron beam power density (with a diameter of D = 250 μm and a voltage U = 28 kV)

Рис. 3. Зависимость массы удаляемого материала от плотности мощности электронного луча (при диаметре D = 250 мкм и напряжении U = 28 кВ)

The short impulse duration (250 ms) makes the evaporation process unstable. One can see that at this duration and power density of about $1.4 \cdot 10^6$ W/cm^2 1,5 mg of material is removed, whereas at power density of $1.45 \cdot 10^6$ W/cm^2 only 1 mg of material is removed. The graph is periodical that can be accounted for auto wave processes that are present when the electronic beam treatment is carried out.

We studied evaporation rate at different values of current of electronic beams (fig. 5).

At initial energy $U = 28$ keV (the output of secondary emissions is very small) and power density of 10^6 W/cm^2 (there is no expansion of the metal due to the powerful waves of compression and unloading) almost all energy is spent on warming up the sample. It can be seen (fig. 5) that the maximum rate of material removal appears at a pulse duration of 0.15–0.3 s. Then the process of evaporation passes stably regardless of the fact that the pulse duration increases [13]. This can be explained by the fact that as the pulse duration is increased, the energy of the electrons is mainly spent on heating the processed material and is carried away as a result of its thermal conductivity.

Experimental results. During the experiment the microstructure of area melted at different impulse duration of the electronic beam was changed (fig. 6–8).

Presented photos show us that the depth of passage of the electron beam depends strongly on the pulse duration. The zone of thermal action at the maximum pulse duration (1 s) is 6.7 mm wide and 4.4 mm deep, which should be taken into account when designing the flywheel rim in the balancing zone [14; 15].

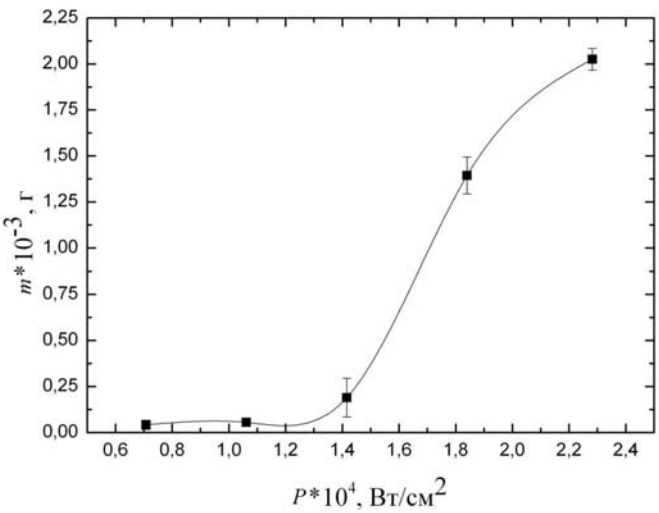


Fig. 4. Dependence of the mass of the material removed on the laser power density (at time $t = 20$ ms)

Рис. 4. Зависимость массы удаляемого материала от плотности мощности лазера (при времени $t = 20$ мс)

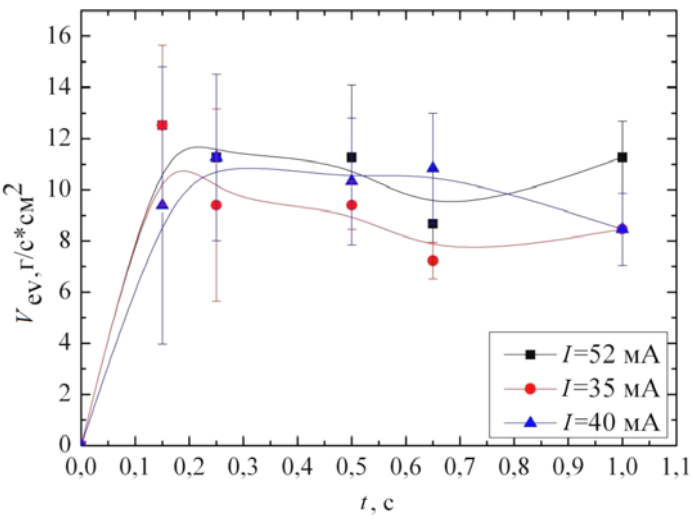


Fig. 5. Dependence of the evaporation rate on the duration of the electron beam pulse ($L = 21$ cm, $U = 28$ kV)

Рис. 5. Зависимость скорости испарения от длительности импульса электронного луча ($L = 21$ см, $U = 28$ кВ)

Hardness of samples, measured by the Vickers method, is distributed depending on the zone (fig. 7).

In the process of research work, a significant shortage of the equipment on which the experiments were performed was revealed: the low power of the electron beam device, and, accordingly, the low accelerating voltage. Consequently, the energy of the beam necessary for evaporation was reached by increasing the current, which led to a considerable overheating of the samples and an increase in the lifetime of the liquid phase prior to the onset of the evaporation process.

The high cooling rate caused by the large temperature gradient in the body of the sample causes the appearance of hardening stresses, which leads to the appearance of cracks (fig. 8).

a *b* *c*

Fig. 6. Microstructure of the melted zone at different time of exposure:
a – at t = 0.1 s; *b* – at t = 0.65 s; *c* – at t = 1 s

Рис. 6. Микроструктура проплавленной зоны при разном времени воздействия:
а – при t = 0,1 с; *б* – при t = 0,65 с; *в* – при t = 1 с

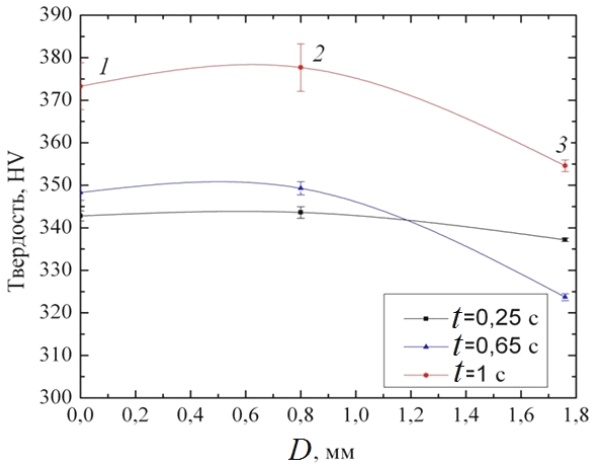


Fig. 7. The distribution of hardness in sample:
1 – the treatment area; *2* – heat affected zone; *3* – steel

Рис. 7. Распределение твердости по образцу:
1 – зона обработки; *2* – зона термического влияния; *3* – сталь

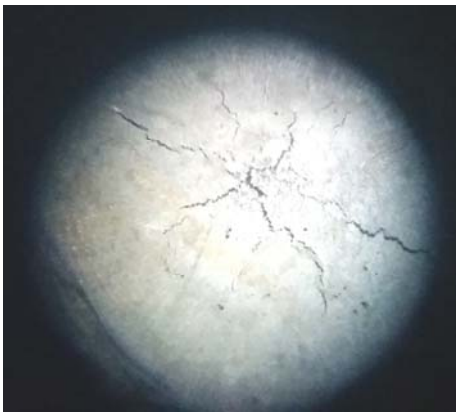


Fig. 8. Cracks in the bath of molten metal samples
of steel 30X13H2CM when exposed to the electron beam

Рис. 8. Трещины в ванне расплавленного металла образцов
из стали 30Х13Н2СМ при воздействии электронного луча

Conclusion. The process of evaporation of a metal under the influence of an acute-focused pulsed electron beam and a laser is studied. The dependence of the evaporation intensity on the parameters of the laser and electron beam modes is established (fig. 3–5).

In the course of the work it was established that when the electron beam is exposed to samples of steel 30X13H2CM due to the long existence of molten metal, recrystallization cracks form at the site of the beam action.

With the use of these parameters and the increase in the number of pulses, it is possible to remove from 1 to 100 mg of substance per process cycle on materials not prone to cracking, or where such cracks are not critical.

Contactless balancing of flywheel rotors with the help of concentrated energy fluxes of laser and electron-beam evaporation of metal is currently possible, but it is necessary to have special equipment with the required output power.

References

1. Ishlinskij A. J. *Mekhanika giroskopicheskikh sistem* [Mechanics of gyroscopic systems]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, 372 p.
2. Perchanok B. H. *Ustranenie vibratsii elektricheskikh mashin* [Elimination of vibration in electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1979, 200 p.
3. Shubov I. G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Din and vibration of electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1973, 259 p.
4. Didenko A. N., Ligachev A. E., Kurakin I. B. *Vozdeystvie puchkov zaryazhennykh chastits na poverkhnost' metallov i splavov* [The impact of charged particle beams on the surface of metals and alloys]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 184 p.
5. Bleykher G. A., Krivobokov V. P., Pachenko O. V. *Massoperenos v tverdom tele pod deystviem moshchnykh puchkov zaryazhennykh chastits* [Mass transfer in solids under the action of powerful charged particle beams]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999, 176 p.
6. Kornilov S. Yu., Osipov I. V., Rempe N. G. [Getting astrosoliology electronic beams in guns with aplasma cathode]. *Pribory i tekhnika eksperimenta.* 2009, No. 3, P. 104–109 (In Russ.).
7. Oks E. M. *Istochniki elektronov s plazmennym katodom* [Electrons sources with plasma cathode]. Tomsk, NTL Press Publ., 2005, 212 p.
8. Belyuk S. I., Osipov I. V., Rempe N. G. [Industry application of Electrons sources with plasma emitter]. *Rissian Physics Zhurnal*. 2001, No. 3, P. 77–84 (In Russ.).
9. *Elektronno-luchevaya apparatura na osnove pushki s plazmennym katodom dlya elektronno-luchevoy svarki. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electron-beam unit with plasma cathode electron-beam gun. Service manual]. 2011, 49 p.
10. Borduleva A. O., Bleykher G. A., Solovev V. V., Krivobokov V. P. and Babihina M. N. Application of strongly focused pulsed electron beam for the reaction wheels balancing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016, P. 1–4.
11. Kornilov S. Yu. *Formirovanie i fokusirovka intensivnykh elektronnykh puchkov v elektronno-opticheskoy sisteme s plazmennym emitterom. Dis. kand. tekhn. nauk* [Generation and focusing of dense electron beams in electron- optical system with plasma emitter. Diss. Cand. Techn. Sci.]. Tomsk, 2006, 16 p.
12. Abrojan I. A., Andronov A. N., Titov A. I. *Fisicheskie osnovi elektronnoi i ionnoi technologii* [Physical foundations of electronic and ionic technology]. Moscow, Vycshaya shkola Publ., 1984, 320 p.
13. Bleykher G. A., Krivobokov V. P. *Erosia poverchnosti tverdogo tela pod deistviem moschnich puchkov sarazenich chastic* [Erosion of a solid surface under the action of powerful charged particle beams]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014, 176 p.
14. Gribkov V. A., Grigorev F. I., Kalin B. A., Jakuschin V. L. *Perspektivnie radiazionno-puchkovie technologii obrabotki materialov* [Promising radiation-beam technologies of material processing]. Moscow, Kruglii stol Publ., 2001, 528 p.
15. Egorov Y. P., Lozinskii Y. M., Hvorova I. A. *Materialovedenie* [Materials Science]. Tomsk, Tomskii politechniheskii universitet Publ., 2009, 219 p.

Библиографические ссылки

1. Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем. М. : Изд-во АН СССР, 1963. 327 с.

2. Перчанок Б. Х. Устранение вибрации электрических машин. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 200 с.

3. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергия, 1973. 259 с.

4. Диденко А. Н., Лигачев А. Е., Куракин И. Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М. : Энергоатомиздат, 1987. 184 с.

5. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П., Пашенко О. В. Массоперенос в твердом теле под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск : Наука, 1999. 176 с.

6. Корнилов С. Ю., Осипов И. В., Ремпе Н. Г. Получение остросфокусированных пучков в электронных пушках с плазменным катодом // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3. С. 104–109.

7. Окс Е. М. Источники электронов с плазменным катодом. Томск : Изд-во НТЛ, 2005. 212 с.

8. Белюк С. И., Осипов И. В., Ремпе Н. Г. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером // Изв. вузов. Физика. 2001. № 9. С. 77–84.

9. Электронно-лучевая аппаратура на основе пушки с плазменным катодом для электронно-лучевой сварки : руководство по эксплуатации. 2011. 49 с.

10. Application of strongly focused pulsed electron beam for the reaction wheels balancing / Solovev V. V. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2016. P. 1–4.

11. Корнилов С. Ю. Формирование и фокусировка интенсивных электронных пучков в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2006. 16 с.

12. Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. М. : Высш. шк., 1984. 320 с.

13. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск : Наука, 2014. 248 с.

14. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов / Грибков В. А. [и др.]. М. : Круглый год, 2001. 528 с.

15. Егоров Ю. П., Лозинский Ю. М., Хворова И. А. Материаловедение : учеб. пособие. 3-е изд. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. 219 с.

© Ermakov D. V., Solovev V. V., 2017

УДК 621.791.75

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 925–931

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НАНОПУЧКОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Г. Г. Крушенко[1, 2*], О. А. Платонов[2], С. Н. Решетникова[2], Г. Г. Киселев[3]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[3]Ракетные войска стратегического назначения
Российская Федерация, 119160, Московская область, г. Власиха
[*]E-mail: o.platonov@mail.ru

При изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов используются разные способы и средства выполнения неразъемных соединений, включая и сварку. Физическая сущность изготовления металлоизделий с применением сварки заключается в получении неразъемного соединения в результате расплавления и совместной кристаллизации материалов сварочного электрода и соединяемых деталей. Недостатком такого способа сборки является структура сварного шва, которая оказывается более крупной, чем структура соединяемого металла, что приводит к снижению механических свойств изделия в зоне сварки. По итогам исследований была установлена возможность измельчения структуры сварного шва и повышения механических свойств сварного изделия типа оболочки, сваренной из листов деформируемого алюминиево-магниевого сплава АМг6 с применением в качестве модификаторов нанопорошков химических соединений. Нанопорошки химических соединений представляют собой сверхмелкозернистые кристаллические или аморфные образования с размерами частиц, не превышающими 100 нм (1 нм = 10^{-9} м), которые обладают уникальными физико-химическими свойствами и механическими характеристиками, существенно отличающимися от таковых для материалов того же химического состава в массивном состоянии. В результате выполненной в производственных условиях работы была установлена возможность измельчения структуры сварного шва и повышения механических свойств сварного изделия типа оболочки, сваренной из листов деформируемого алюминиево-магниевого сплава АМг6 с применением в качестве модификаторов нанопорошков химических соединений нитрида бора BN, гексаборида лантана LaB_6 и карбонитрида титана TiCN.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварка, наномодифицирование.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 925–931

FABRICATION AND WELDING OF ALUMINUM ALLOYS BY NANOPACKAGING ELECTRODES

G. G. Krushenko[1, 2*], O. A. Platonov[2], S. N. Reshetnikova[2], G. G. Kiselev[3]

[1]Institute of Computational Modelling SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[3]Strategic rocket forces
Vlasikha, Moscow region, 119160, Russian Federation
[*]E-mail: o.platonov@mail.ru

In the manufacture of structures made of aluminum alloys, there are different ways and means of carrying out permanent joints, including welding. The physical essence of the manufacture of metal products by welding consists in obtaining permanent connections as a result of melting and crystallization of the material of the welding electrode and the parts to be joined. The disadvantage of this method of Assembly is that the structure of the weld which is larger than the structure of the connected metal, which leads to lower mechanical properties in the weld zone. According to the results of the research there was a possibility of grinding the structure of the weld and improve the mechanical properties of the weldment type of a shell, welded from sheets of wrought aluminum-magnesium alloy AMg6 with the application as modifiers of nanopowders of chemical compounds. Nanopowders of chemical compounds represent superslow crystalline or amorphous formation with particle sizes not exceeding 100 nm (1 nm = 10^{-9} m), which possess unique physical and chemical properties and mechanical characteristics that are significantly different from those for materials of the same chemical composition in a solid state. As a result, the work performed in a production environment there was the possibility of grinding the structure of the weld and improve the mechanical properties of the weldment type of a shell,

welded from sheets of wrought aluminum-magnesium alloy AMg6 with the application as modifiers of nanopowders of chemical compounds of boron nitride BN, lanthanum hexaboride LaB6 and titanium carbonitride TiCN.

Keywords: aluminium alloys, welding of system hardening.

Введение. При изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов используются разные способы и средства выполнения неразъемных соединений, включая и сварку [1; 2].

Физическая сущность изготовления металлоизделий с применением сварки заключается в получении неразъемного соединения в результате расплавления и совместной кристаллизации материалов сварочного электрода и соединяемых деталей. Недостатком такого способа сборки является тот факт, что при этом структура сварного шва оказывается более крупной, чем структура соединяемого металла, кстати, структура которого в зоне влияния нагрева тоже укрупняется, а это приводит к снижению механических свойств изделия в зоне сварки. В качестве примера на рис. 1 приведена структура узла сварки изделия из листового алюминиево-магниевого сплава АМг5 [3] и из стали 10ХСНД [4], на которых видна значительно более крупная структура сварного шва, по сравнению со свариваемым материалом.

При этом следует отметить, что в многочисленных работах однозначно установлено, что металлоизделия с мелкокристаллической структурой обладают более высокими механическими свойствами по сравнению с крупнокристаллической. Такая особенность металлов хорошо описывается классическим соотношением Холла–Петча (Hall–Petch dependence) [5; 6]:

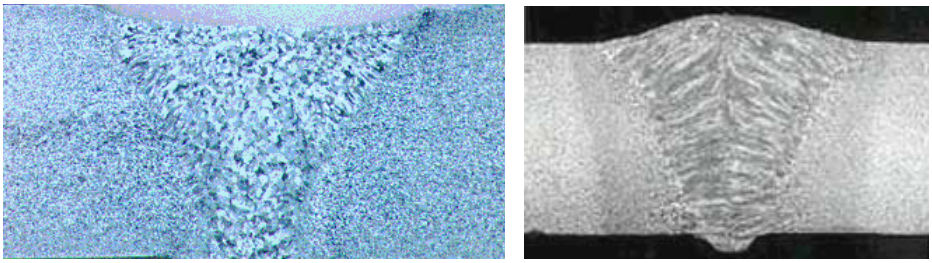
$$H_v(\sigma_T) = H_0(\sigma_0) + \frac{k}{\sqrt{D}},$$

где H_v – твердость материала; σ_T – предел текучести; H_0 – твердость тела зерна; σ_0 – внутреннее напряжение, препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна; k – коэффициент пропорциональности; D – размер зерна. Из приведенной формулы видно, что с уменьшением размера зерна происходит увеличение прочности материала.

Модифицирование сплавов. В то же время из опыта производства литых изделий известно, что с целью измельчения их структуры применяется так называемое модифицирование [7], суть которого заключается во введении в жидкий металл веществ, либо служащих центрами кристаллизации, либо блокирующих рост формирующихся кристаллов путем ограничения подхода к ним однородного материала из окружающей металлической жидкости. В ряде случаев оба процесса идут либо одновременно, либо в такой последовательности: зарождение центров кристаллизации → блокирование роста кристаллов.

В этой связи следует дать пояснения относительно приведенной на рис. 1 структуры алюминиево-магниевого сплава АМг5, который относится к деформируемым, листовая продукция из которого производится путем прокатки слитков, отливаемых полунепрерывным способом. При этом с целью измельчения структуры слитков при подготовке расплава к литью в него с помощью алюминиево-титановой лигатуры (промежуточные сплавы, состоящие из элементной основы сплава и модифицирующей добавки) вводят титан (в пределах 0,02–0,1 %), который образует в жидком металле мелкодисперсные интерметаллические соединения $TiAl_3$, служащие центрами кристаллизации [7]. Кроме того, структура дополнительно значительно измельчается при прокатке слитка в лист в результате многократной деформации. И тем не менее, сварка приводит к укрупнению структуры, что и сказывается отрицательно на качестве сварного изделия.

Существует достаточно большое количество средств и способов модифицирования, в основном, как указывалось выше, путем введения модифицирующих добавок в жидкий металл лигатурами (сплав, состоящий из основы готовящегося сплава и модифицирующей добавки). Однако возможности таких средств модифицирования практически достигли своих пределов, и в последние годы находит применение новый способ модифицирования – путем введения в жидкий металл нанопорошков (НП) химических соединений, который защищен десятками патентов, начиная с 1981 г. [8] по настоящее время [9].



а *б* *а* *а* *б* *а*

сплав АМг5 сталь 10ХСНД

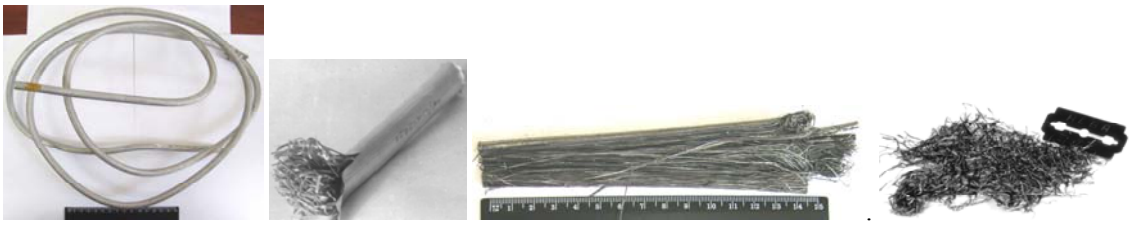
Рис. 1. Структура узла сварки сплава АМг5 и стали 10ХСНД:
а – основной материал; *б* – сварной шов

Fig. 1. The node structure welding of AMg5 alloy and steel 10KHSND:
a – main material; *b* – weld

Нанопорошки химических соединений. Нанопорошки химических соединений представляют собой сверхмелкозернистые кристаллические или аморфные образования с размерами частиц, не превышающими 100 нм (1 нм = 10^{-9} м), которые обладают уникальными физико-химическими свойствами и механическими характеристиками, существенно отличающимися от таковых для материалов того же химического состава в массивном состоянии. Причина уникальности свойств НП заключается в том, что количество атомов в их поверхностном слое и в объеме оказывается соизмеримым [10]. Вследствие малых размеров и высокой реакционной способности НП и возникла идея их введения в металлические расплавы в качестве модификаторов. Однако существующие способы введения в металлические расплавы порошкообразных добавок не могли быть приняты при использовании НП вследствие их особых свойств по сравнению с более крупными порошками. Так, частицы НП легко «слипаются», их окисление начинается при сравнительно низких температурах, и, что особенно важно, они выполняют роль центров кристаллизации – плохо смачиваются жидким металлом, что является основанием для начала формирования кристаллов. Кроме того, несмотря на высокую плотность (от 1380 кг/м^3 – TaN до 2510 кг/м^3 – B_4C), НП легко образуют в воздухе пылевидную взвесь, при определенных условиях самовозгорающуюся и даже взрывоопасную. Все это делает практически невозможным прямое введение НП в расплавы, поэтому был разработан принципиально новый способ их введения, блокирующий перечисленные выше негативные явления.

Изготовление наномодифицирующих прутков. С этой целью в тонкостенный алюминиевый контейнер (∅ 165 мм, h = 235 мм, толщина стенки 2 мм) засыпали плакированные нанопорошком частицы алюминия или алюминиевых деформируемых сплавов либо в виде гранул размером 1,5…3,0 мм, получаемых из сплавов Д1 или Д16 методом центробежной разливки, либо в виде крупки первичной марки АКП (ТУ 48-5-38-78) с размерами частиц в диапазоне 0,02–0,04 мм, получаемой из алюминия марки А5 методом распыления, либо «сечки» – частиц алюминия диаметром 2,0 мм, высотой 1,5–2,0 мм, получаемых нарезанием алюминиевой проволоки. Затем отверстие в контейнере закрывали алюминиевой крышкой, производили ее завальцовку, подвергали контейнер вращению в установке с эксцентричными осями. После чего его помещали в контейнер гидравлического пресса и с усилием прессования 100–120 тс со скоростью 3,5 см/с прессовали прутки диаметром от 5 до 9,5 мм, особенностью которых оказалось их волокнистое внутреннее строение при тонкой оболочке (десятые доли мм) (рис. 2).

Волокнистое строение прутка объясняется тем, что из-за нахождения частиц НП на поверхности частиц алюминия в процессе экструзии они деформировались изолированно друг от друга, что подтверждается результатами микроскопического изучения поверхности как плакированных частиц алюминия, так и волокон. Оказалось, что волокна полностью покрыты прочно внедрившимися в их поверхность частицами НП. Это наблюдение свидетельствует, во-первых, о большом количестве частиц НП в прутках и, во-вторых, об их достаточно равномерном распределении в объеме, что, в-третьих, гарантирует получение равномерно измельченной структуры в объеме литой детали. В прутках ∅ 9,5 мм насчитывалось от 1100 до 1200 волокон с площадью сечения в пределах 0,005–0,075 мм^2. Расчет показал, что длина таких волокон в зависимости от размера частиц алюминия находилась в интервале 400–3200 мм. От размеров прессуемых частиц алюминия, т. е. от площади их поверхности, зависит содержание НП в объеме прутка, и чем частицы меньше, тем суммарная площадь находящихся в объеме контейнера частиц алюминия больше, и, следовательно, в прутке будет содержаться больше НП. Результаты взвешивания показали, что содержание НП в прутках находилось в пределах 1,5–2,7 мас. %. Полученные прутки служили носителем модификатора: при их введении в расплав алюминиевая матрица расплавлялась, и частицы НП оказывались в объеме жидкого металла, минуя контакт с атмосферой. Количество любого из НП, вводимого в любые исследуемые сплавы, не превышало 0,05 %, а в отдельных случаях – всего до тысячных долей процента. Расход прутка при этом составляет 20–25 кг на 1 т металла.



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Отпрессованные прутки:
а – ∅ 9,5 мм, L = 4,0 м (черная полоска в нижней части рисунка – линейка длиной 160 мм);
б, *в* – фрагменты прутка со вспоротой оболочкой; *г* – извлеченные из прутка волокна

Fig. 2. The pressed bars:
a – ∅ 9.5 mm, L = 4.0 m (black strip at the bottom – line of length 160 mm);
b, *c* – fragments of the rod to rip the shell; *d* – extracted from the rod fiber

Наномодифицирование сплавов. В качестве модификаторов алюминиевых литейных и деформируемых сплавов, чугуна и стали опробовано более 20-ти химических соединений, включая AlN, Al_2O_3,, B_4C, BN, $Cr_3C_{1,6}N_{0,4}$, HfN, HfB_2, LaB_6, SiC, Si_3N_4, TaN, $Ti_xC_yN_z$, $Ti_xC_yN_zO_i$, TiN, TiO_2, VC, $V_xC_yN_z$, $V_{0,75}N_{0,25}$, а также смеси (AlN + TiN), (BN + B_4C), (SiC + B_4C). Эти соединения относятся к промежуточным фазам, характерной особенностью которых является высокая степень устойчивости, неметаллический характер и высокая температура плавления (в диапазоне 2273–3273 К).

В результате введения НП B_4C, SiC, $Ti_xC_yN_z$, TaN, смеси (B_4C + BN) в алюминиевые литейные сплавы АК7, АК12, АК9ч, АК7ч, АК7Ц9 и др., измельчается макро- и микроструктура, что приводит к увеличению $\sigma_в$ отливок на 2,5–19,3 % и δ – в 1,5–7,3 раза. В результате введения НП B_4C в сплавы АК7ч и АМ5 при получении из них деталей жидкой штамповкой повышается удлинение δ – соответственно на 50 и 19 % при сохранении уровня $\sigma_в$. При введении НП SiC, B_4C, BN, LaB_6, TaN, $Ti_xC_yN_z$, TiCNO, TiN, TiO_2, $V_xC_yN_z$, смеси AlN + BN, смеси HfN + HfB_2 в алюминиевые деформируемые сплавы при литье полунепрерывным способом слитков ∅ 190 мм из сплава Д16, ∅ 300, 420 и 500 мм из сплава АМг6, ∅ 480 мм из сплава Д1 происходит измельчение зерна в 1,7–20 раз, что приводит к повышению механических свойств отпрессованных из них профилей различного сечения: $\sigma_в$ – на 2,5–8,8 %; $\sigma_{0,2}$ – на 2,0–16,1 %; δ – на 11,8–31,0 % [11–14].

Наномодифицирование сварного шва. Исходя из идентичности механизмов кристаллизации литых деталей и сварного шва, было решено опробовать сварку описанными выше прутками, прессование которых производилось по той же технологии, но с дополнительным введением в прессуемую композицию флюса АН–А4 (57,0 % KCl; 28,0 % BaF_2; 7,5 % LiF; 7,5 % AlF_3) [15].

Следует при этом отметить, что, если для изготовления подобных электродов, названных пучковыми, применялась достаточно сложная технология [16], которая заключалась в нарезании сварочной проволоки на мерные заготовки, вкладывании их в кондуктор, обжимании в нагретом состоянии до плотного прилегания, вставлении их в муфту, которая вместе с прутками нагревается до сварочной температуры, после чего сваривается с прутками проковкой, далее изготовленный пучковый электрод вынимается из кондуктора и окунается в обмазку, которая является элементом, связующим отдельные прутки в электрод, то технология изготовления сварочных прутков, содержащих НП, оказывается значительно проще, и заключается она практически в выполнении только двух операций: 1) в смешивании частиц алюминия с частицами НП и с флюсом; 2) в прессовании этой композиции в сварочную проволоку (пруток).

Следует отметить, что применение нанопорошковых материалов при сварке описано в нескольких работах. Так, в работе [17] представлены результаты использования НП серебра с размерами частиц 5 и 100 нм в качестве «вставного материала» (*using silver nanoparticles as an insert material*) при лазерной сварке листов из магниевого сплава. При этом на листы предварительно наносили пасту, содержащую НП серебра, после чего их нагревали до 100 ºС в течение 60 с с целью испарения пасты. Затем листы накладывали друг на друга сторонами, плакированными магниевыми наночастицами, и сканировали поверхность верхнего листа лазером, в результате чего частицы магниевого порошка расплавлялись, и при последующей кристаллизации магниевого расплава происходило прочное скрепление листов.

В другой работе [18] сварку разнородных металлов (Al–Ti, Ti–сталь) проводили с помощью непрерывного CO_2-лазерного излучения с применением модифицирующих инокуляторов в виде порошков нитрида титана TiN и оксида иттрия Y_2O_3 (размер частиц – до 20 мкм), частицы которых плакировали хромом. При этом так же, как и в предыдущей работе, предварительно приготовленная суспензия, содержащая эти порошки, наносилась на поверхность свариваемых пластин толщиной 1–2 мм. В результате применения этого способа структурные составляющие сварного шва измельчаются в 2–4 раза, а вместо игольчато-дендритной формируется дисперсная равноосная структура, выравниваются механические характеристики, уменьшаются размер шва и зона термического влияния, и, соответственно, повышаются механические свойства: временное сопротивление разрушению $\sigma_в$ – в 1,23–1,35 раза, предел текучести $\sigma_{0,2}$ – в 1,8–2,0 раза и относительное удлинение δ – в 2,0–4,9 раза. По-видимому, меньший эффект повышения механических свойств, чем в случае сварки электродом, содержащим нанопорошки (размер частиц – нанометры), связан со значительно большими размерами частиц (микроны) применяемых порошков. Существенным недостатком описанных способов сварки является необходимость использования пасты и суспензии в качестве «магазинов» хранения порошков с вытекающим из этого такого последствия, как сложность нанесения слоя именно такой толщины, которая обеспечит присутствие в сварочном шве требуемого количества порошка. Другой недостаток заключается в сложности закрепления пасты и суспензии на поверхностях, лежащих в трех измерениях. Эти недостатки отсутствуют при сварке электродами, содержащими НП.

Настоящая работа была выполнена в производственных условиях при изготовлении объемной конструкции из листового деформируемого алюминиево-магниевого сплава АМг6 (5,8–6,8 % Mg; 0,5–0,8 % Mn; 0,02–0,1 % Ti; 0,0002–005 % Be; примеси – до 0,1 %; остальное – Al), близкого по составу к сплаву АМг5, в связи с тем, что при ее сварке с использованием присадочной проволоки, изготовленной из этого же сплава, не всегда обеспечивалась требуемая прочность сварного соединения. Как показало металлографическое исследование, причиной этого оказался тот факт, что металл сварного шва отличался от металла листа более крупными зернами α-твердого раствора и более крупными выделениями β-фазы (Al_3Mg_2) по их границам.

В настоящей работе применяли электрод с волокнистым строением диаметром 8 мм, содержащий порядка 2,0 % НП нитрида бора BN или гексаборида лантана LaB_6, или карбонитрида титана TiCN и 2,0 % флюса АН-А4. Сварку производили с помощью автоматической установки в среде аргона. Фрагменты сварки листов АМг6 приведен на рис. 3.

Качество шва по требованиям приемочной документации оценивали по величине временного сопротивления разрушению $\sigma_в$ при испытании вырезанных из сварной конструкции плоских образцов с размерами 15×50 мм. Результаты испытаний показали, что $\sigma_в$ металла в области шва при сварке прутком, содержащим НП BN, составляет 333 МПа, НП LaB_6 – 338 МПа и НП TiCN – 345 МПа. Эти значения оказались, соответственно, выше на 4,1, 5,6 и 7,8 %, чем имеют образцы из сплава АМг6 (320 МПа), сваренные по стандартной технологии электродом из этого же сплава (см. таблицу).

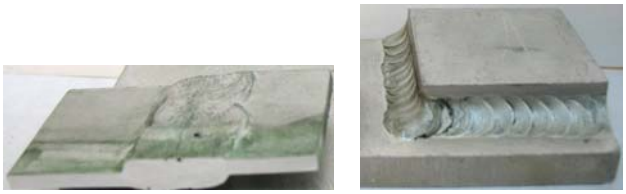
Изучение микроструктуры сварного шва показало, что в его объеме какие-либо дефекты отсутствуют. При этом зерно в свариваемом листе вытянуто вдоль прокатки, а его размеры лежат в интервале ~ 0,3–0,4 мм. Зерно в сварном шве – мелкое, равноосное, его размеры составляют ~ 0,01–0,03 мм, что в среднем меньше, чем в основном металле в 17,5 раза. Интерметаллидные фазы оказались в раздробленном состоянии. Можно полагать, что повышение $\sigma_в$ связано не только с измельчением структуры шва и с измельчением интерметаллидов, но и с дисперсионным упрочнением α-твердого раствора сплава тонкодисперсными частицами НП. Микротвердость основного металла и сварного шва одного уровня – 76,4–78,7 HV (среднее – 77,55 HV, или 73,5 HB), т. е. при сварке разупрочнение не происходит.

Очевидно, аналогичный эффект имеет место в результате введения в сварочную ванну диоксида титана TiO_2 с помощью металлохимической присадки МХП (рубленая сварочная проволока ∅ 2 мм, смешанная с двуокисью титана TiO_2), что приводит к формированию такой структуры металла сварного шва, которая обеспечивает высокие показатели прочности, пластичности и вязкости [19].

Сварка электродом, содержащим НП карбонитрида титана TiCN, была успешно применена для заварки трещины в ступице массивного винта станции газоочистки цеха технологических котлов целлюлозно-бумажного комбината. Заварку производили в среде аргона. Было установлено, что в металле шва и в околошовной зоне трещины отсутствовали, тогда как при наплавке принятой по технологии алюминиевой проволокой этот дефект зачастую присутствует.

В следующей серии работ было установлено, что в результате предварительной механоактивации композиции, состоящей из частиц алюминия и НП, и последующего ее прессования содержание НП (на примере НП TiN) в прутке увеличивается до 7,7 мас. %, что в еще большей степени позволяет повысить скорость сварки при одновременном уменьшении расхода электродной проволоки.

Заключение. В результате выполненной в производственных условиях работы была установлена возможность измельчения структуры сварного шва и повышения механических свойств сварного изделия типа оболочки, сваренной из листов деформируемого алюминиево-магниевого сплава АМг6 с применением в качестве модификаторов нанопорошков химических соединений нитрида бора BN, гексаборида лантана LaB_6 и карбонитрида титана TiCN.



а *б*

Рис. 3. Фрагменты сварки электродом, содержащим нанопорошок карбонитрида титана TiCN, листовой конструкции из листов сплава АМг6 толщиной:
а – 5,0 мм; *б* – 8,0 мм

Fig. 3. Fragments of the sheet structures welding of sheets of alloy AMg6 thickness: *a* – 5.0 mm; *b* – 8.0 mm electrode containing nanopowder of titanium carbonitride TiCN

Влияние вида электродов на временное сопротивление разрушению металла в области сварного шва при сварке листового сплава АМг6

Временное сопротивление разрушению $\sigma_в$ (МПа) металла в области сварного шва при сварке электродом			
Из сплава АМг6 без нанопорошка	Содержащим нанопорошок		
	BN	LaB_6	TiCN
Величина	Величина/прирост, %	Величина/прирост, %	Величина/прирост, %
320	333/4,1	338/5,6	345/7,8

Библиографические ссылки

1. Пат. 2357841 Российская Федерация, МПК С 2 В 23 К 9/23, В 23 К 9/16, В 23 К 33/00. Способ дуговой сварки в инертных газах стыковых соединений разнородных алюминиевых сплавов / Алексеев В. В., Овчинников В. В., Грушко О. Е., Гуреева М. А., Гирш Р. И. № 2006128314/02 от 03.08.2006, Бюл. № 16. 2009.

2. Hartman D. A., Davé V. R., Cola M. J. In-process quality assurance for aerospace welding // Welding Journal. 2009. Vol. 88. № 1. P. 28–31.

3. Паршин С. Г. Электродуговая сварка с применением активирующих флюсов. Самара : Самарский научный центр РАН, 2006. 380 с.

4. Исследование влияния режимов полуавтоматической сварки на выпрямителях типа ВД-506ДК металлопорошковой проволокой POWER BRIDGE 60M в смесях газов на механические и вязкопластические свойства наплавленного металла при сварке мостовых конструкций / М. В. Карасев [и др.] // Сварка и диагностика. 2009. № 1. С. 19–24.

5. Hall E. O. The deformation and Ageing of Mild Steel. III. Discussion of Results // Proceeding of the Physical Society. Section B. 1951. Vol. 64, № 9. P. 717–753.

6. Petch N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals // Journal of Iron and Steel Institute. 1953. Vol. 174. P. 25–28.

7. Бондарев Б. И., Напалков В. И., Тарарышкин В. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М. : Металлургия, 1979. 224 с.

8. А. с. 831840 СССР, МПК[5] А 1 С 22 С 1/06. Способ модифицирования литейных алюминиевых сплавов эвтектического типа / Г. Г. Крушенко, Ю. М. Мусохранов, И. С. Ямских, А. А. Корнилов, С. Г. Крушенко. № 2831160 от 17.10.1979, Бюл. № 19. 1981.

9. Пат. 2475334 Российская Федерация, МПК С 2 В 22 F 3/20, С 22 С 1/06, В 22 F 1/00, С 22 С 21/04. Способ получения модификатора для доэвтектических алюминиево-кремниевых сплавов / Крушенко Г. Г., Фильков М. Н. № 2011122498/02 от 02.06.2011, Бюл. № 5. 2013.

10. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. М. : Атомиздат, 1977. 264 с.

11. Измельчение структуры сплава Д16 при модифицировании прутками с ультрадисперсными порошками / Г. Г. Крушенко [и др.] // Цветная металлургия. 1991. № 4. С. 8–10.

12. Повышение механических свойств алюминиевых литейных сплавов с помощью ультрадисперсных порошков / Г. Г. Крушенко [и др.] // Литейное производство. 1991. № 4. С. 17–18.

13. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1995. 344 с.

14. Нанопорошковые технологии в машиностроении / В. В. Москвичев [и др.] ; Сибирский федеральный университет. Красноярск. 2013. 186 с.

15. Пат. 2429958 Российская Федерация, МПК С 2 В 23 К 35/40. Способ изготовления электродной проволоки для сварки алюминиевых сплавов / Крушенко Г. Г. ; № 2009131289/02 ; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27. 2011.

16. А. с. 87411 СССР, Класс 21h, 30.6. Способ изготовления пучковых электродов / Н. В. Бродович, А. В. Обухов. № 411121 ; опубл. 01.01.1950.

17. Ishak M., Maekawa K., Yamasaki K. The characteristic of laser welded magnesium alloy using silver nanoparticles as insert material // Materials Science and Engineering: A. 2012. Vol. 536. P.143–151.

18. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик / Сибирское отделение РАН. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. С. 138–139.

19. Болдырев А. М. Взаимодействие диоксида титана со сварочной ванной при автоматической сварке под флюсом стали 10ХСНД с металлохимической присадкой // Сварочное производство. 2014. № 9. С. 14–19.

References

1. Alexeev V. V., Ovchinnikov V. V., Grushko O. E., Gureeva M. A. *Sposob dugovoy svarki v inertnykh gazakh stykovykh soedineniy raznorodnykh alyuminievykh splavov* [Method of arc welding in inert gases butt joints of dissimilar aluminum alloys]. Patent RF, No. 2006128314/02, 2009.

2. Hartman D. A., Davé V. R., Cola M. J. In-process quality assurance for aerospace welding. *Welding Journal.* 2009, Vol. 88, No. 1, P. 28–31.

3. Parshin S. G. *Elektrodugovaya svarka s primeneniem aktiviruyushchikh flyusov* [Arc welding with application of activating fluxes]. Samara, Samara scientific center of RAS Publ., 2006. 380 p

4. Karasev M. V., Rabotinsky D. N., Grebenchuk V. G. et al. Research of influence of modes of semi-automatic welding rectifiers type VD-506DK metal cored wire POWER BRIDGE 60M in mixtures of gases on the mechanical and visco-plastic properties of the weld metal in welding of bridge structures]. *Svarka I Diagnostika.* 2009, No. 1, P. 19–24 (In Russ.).

5. Hall E. O. The deformation and Ageing of Mild Steel: III. Discussion of Results. *Proceeding of the Physical Society*. Section B. 1951, Vol. 64, No. 9, P. 717–753.

6. Petch N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals. *Journal of Iron and Steel Institute*. 1953, Vol. 174, P. 25–28.

7. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararyshkin V. I. *Modifitsirovanie alyuminievykh deformiruemykh splavov* [Modification of wrought aluminium alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979, 224 p.

8. Krysenko G. G., Musohranov J. M., Yamskih I. S., Kornilov A. A., Krushenko S. G. *Sposob modifitsirovaniya liteynykh alyuminievykh splavov evtekticheskogo tipa* [Method of modification of cast aluminum alloys of eutectic type]. Patent RF, No. 2831160, 1981.

9. Kruchenko G. G., Filkow M. N. *Sposob polucheniya modifikatora dlya doevtekticheskikh alyuminievokremnievykh splavov* [A method of producing a modifier for doauthenticate aluminum-silicon alloys] Patent RF, No. 2475334, 2013.

10. Morokhov I. D., L. I. Trusov, Chizhik S. P. *Ul'tradispersnye metallicheskie sredy* [Ultrafine metal environment]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 264 p.

11. Krushenko G. G., Filkov M. N., Balashov B. A. et al. [Refinement of the structure of the D16 alloy in the case of modifying rods with ultrafine powders]. *Tsvetnaya metallurgiya.* 1991, No. 4, P. 8–10 (In Russ.).

12. Krushenko G. G., Balashov B. A., Vasilenko Z. A. et al. [Improvement of mechanical properties of aluminum casting alloys with ultradispersed powders]. *Liteynoe proizvodstvo.* 1991, No. 4, P. 17–18 (In Russ.).

13. Saburov V. P., Cherepanov A. N., Krushenko G. G. et al. *Plazmokhimicheskiy sintez ul'tradispersnykh poroshkov i ikh primenenie dlya modifitsirovaniya metallov i splavov* [Plasmachemical synthesis of ultradisperse powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Science. Siberian publishing firm of RAS, 1995, 344 p.

14. Moskvichev V. V., Krushenko G. G., Burov A. E. et al. *Nanoporoshkovye tekhnologii v mashinostroenii* [Nanopowder technology in mechanical engineering]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2013, 186 p.

15. Krushenko G. G. *Sposob izgotovleniya elektrodnoy provoloki dlya svarki alyuminievykh splavov* [A method of manufacturing the electrode wire for welding aluminium alloys]. Patent RF, No. 2429958, 2011.

16. Brodovich N. V., Obukhov A. V. *Sposob izgotovleniya puchkovykh elektrodov* [A method of manufacturing a beam-type electrodes]. Patent RF, No. 411121, 1950.

17. Ishak M., Maekawa K., Yamasaki K. The characteristic of laser welded magnesium alloy using silver nanoparticles as insert material. *Materials Science and Engineering*. A. 2012, Vol. 536, P. 143–151.

18. The impact of high-concentrated energy fluxes on materials to change their physical-chemical properties and improve the performance. SB RAS in 2007. Novosibirsk, Publishing house so ran, 2008, P. 138–139.

19. Boldyrev A. M. [Interaction of titanium dioxide with the welding bath during automatic submerged-arc welding of steel 10KHSND with metallogenically additive]. *Svarochnoe proizvodstvo.* 2014, No. 9, P. 14–19 (In Russ.).

© Крушенко Г. Г., Платонов О. А.,
Решетникова С. Н., Киселев Г. Г., 2017

УДК 621.7.09

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 932–938

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРАМИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

В. А. Левко*, А. Е. Симакова, Д. И. Савин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: levko@sibsau.ru

Предложен подход, при котором для каждой стадии жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком определяется набор факторов и функций отклика. На следующей стадии жизненного цикла функции отклика предыдущей стадии становятся факторами (исходными данными).

Анализ публикаций показал, что в них отсутствует систематизированное описание факторов технологического процесса обработки абразивным потоком на разных стадиях жизненного цикла.

Предпринята попытка систематизировать переменные данной технологии и установить их взаимосвязь через этапы жизненного цикла рабочей среды как инструмента финишной обработки.

Приведено описание жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком. Жизненный цикл включает в себя пять стадий, разделенных на тринадцать этапов. На основе анализа мирового опыта для каждого этапа предложен набор факторов, позволяющих дать характеристику обрабатываемой детали, рабочей среды, режимов обработки, а также контактных взаимодействий между абразивным зерном и обрабатываемой поверхностью.

Авторы сделали описание особенностей стадии изготовления жизненного цикла рабочей среды, в котором раскрываются особенности технологии ее изготовления.

Описанный подход позволяет повысить эффективность обработки абразивным потоком за счет снижения затрат на подготовку производства и эксплуатацию рабочей среды. Этот факт особенно важен для производства ракетно-космической техники, характеризующейся широкой номенклатурой деталей с различными видами поверхностей, которые требуют операции финишной обработки.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, рабочая среда, жизненный цикл, фактор, эффективность обработки.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 932–938

THE EFFICIENCY IMPROVING OF ABRASIVE FLOW MACHINING ON MANAGING OF THE LIFE CYCLE FACTORS OF MEDIA

V. A. Levko*, A. E. Simakova, D. I. Savin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: levko@sibsau.ru

The article proposes the approach in which a set of factors and response functions is determined for each stage of the life cycle of the working medium for abrasive flow machining treatment. The response functions in turn in the next stage become factors (initial data). The analysis of publications has shown that in the literature there is no systematized description of the factors of the technological process of abrasive flow machining at different stages of the life cycle.

An attempt is made to systematize the variables of this technology and to establish their interrelation through the stages of the life cycle of the working media as a finishing tool.

The authors describe the life cycle of the working medium for abrasive flow machining. The life cycle includes five stages, divided into thirteen stages. On the basis of the analysis of the world experience, a set of factors is proposed for each stage enabling to give a characteristic of the workpiece, working medium, processing modes, as well as contact interactions between the abrasive grain and the surface to be finished.

The authors made a description of the peculiarities of the stage of manufacturing the stage of the experimental batch of the life cycle of the working environment, in which features of the technology of its production are disclosed.

The approach described in the article makes it possible to improve the efficiency of abrasive flow machining by reducing the costs of preparing the production and operating the working media. This fact is especially important for the production of rocket and space technology, characterized by a wide range of parts with different types of surfaces that require finishing operations.

Keywords: abrasive flow machining, media, life cycle, factor, improving the efficiency.

Введение. Производство ракетно-космической техники характеризуется наличием широкой номенклатуры деталей со сложными поверхностями. В ряде случаев формообразование и обеспечение качества изготовления таких поверхностей возможно только специальными методами литья или электроэрозионной обработкой с последующей финишной обработкой.

Выбор вида финишной обработки имеет большое значение, так как полученные вышеперечисленными методами поверхности имеют дефектный слой, характеризующийся высоким уровнем остаточных напряжений, деформационного упрочнения (наклепа) и неровностей поверхности, что снижает их надежность и работоспособность, сопротивление усталости и прочность.

Мировая практика производства ракетно-космической техники показывает, что одной из наиболее трудоемких, неконтролируемых областей в изготовлении сложных, прецизионных деталей являются заключительные операции чистовой обработки. Их доля может достигать до 15 % от общего объема затрат на производство [1].

Это обусловлено тем, что финишная обработка сложных поверхностей традиционными способами обработки практически не применяется из-за затрудненного доступа инструмента к обрабатываемой поверхности. Для этих целей все большее применение получают нетрадиционные методы финишной обработки, в которых в качестве инструмента применяется поток разнообразных жидкостных или уплотненных сред, несущих рабочие элементы, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями.

Одним из представителей нетрадиционных методов финишной обработки является обработка абразивным потоком (abrasive flow machining), которая в России имеет названия абразивно-экструзионной обработки или экструзионного хонингования. Отмечено, что внедрение в широкое промышленное производство этой технологии сдерживается отсутствием систематизированных теоретических основ процесса, что не дает возможности оценить границы применимости способа с научной точки зрения [2].

За последние годы появился ряд работ, посвященных исследованиям различных аспектов этого метода. Так, дано описание расчета сил, возникающих при деформации материала при обработке абразивным потоком [3]. Приведены результаты исследования влияния геометрических параметров абразивных зерен при обработке абразивным потоком [4], а также параметров процесса, влияющих на силы резания при обработке абразивным потоком [5]. Дана характеристика контактным процессам при абразивно-экструзионной обработке [6], а также на основе модели контактных взаимодействий предложен метод расчета шероховатости поверхности [7]. Приведен обзор современного состояния и применения процессов отделки абразивным потоком в англоязычной литературе [8], а также обзор экспериментальных исследований с использованием вариантов обработки абразивным потоком и сред [9].

Была предложена методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей [10]. Эта методика включает в себя шесть этапов и позволяет сократить объем и сроки экспериментальных исследований при разработке оптимальных режимов обработки абразивным потоком новых деталей.

Предложен промышленно осуществимый подход к оптимизации процессов обработки абразивным потоком и перспективы реализации, позволяющие значительно улучшить точность и эффективность процесса [11]. Этот подход может быть использован для оптимизации конструкции установки для обработки и новых методов закрепления заготовки при обработке. Подход включает в себя восемь этапов. Первые два этапа, исходя из шероховатости поверхности и формы обрабатываемого канала, позволяют осуществить выбор режимов обработки и состава рабочей среды (потока). Эти данные, наряду с требуемым результатом обработки (описывается на третьем этапе), помогают сформулировать на четвертом этапе целевые показатели потока: скорость, температуру, объем и состав. На пятом этапе эти данные используются для расчета режима течения по уравнениям Бернулли и Хагена–Пуазейля. Там же для потока среды определяется число Рейнольдса. На шестом этапе определяют перепад давлений и реальную скорость потока, а также характер потока. На седьмом этапе моделируются параметры обработки и свойства среды, а также определяется геометрия приспособления для закрепления детали. На восьмом этапе происходит окончательное моделирование процесса [11].

Обработка абразивным потоком является сложным процессом, характеризующимся целым рядом физических явлений. Число переменных, с разной степенью влияющих на эффективность процесса обработки, велико. Для успешного внедрения технологии обработки абразивным потоком в производство по предложенным методикам потребуется участие специалистов в этой области.

Анализ публикаций показал, что в обзорах нет систематизированного описания факторов технологического процесса обработки абразивным потоком на его разных этапах. Например, нет данных о переменных, влияющих на стойкость рабочей среды, сроки ее хранения, способы изготовления и утилизации.

В работе предпринята попытка систематизировать переменные данной технологии и установить их взаимосвязь через этапы жизненного цикла рабочей среды как инструмента финишной обработки. Такой подход позволит выработать рекомендации по выбору факторов на каждой стадии жизненного цикла и повысить эффективность обработки абразивным потоком.

Жизненный цикл рабочей среды. Жизненный цикл изделия, жизненный цикл (life cycle) – это совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [12].

Для жизненного цикла инструментов, применяемых в металлообработке, принято выделять четыре стадии. На стадии разработки (development) выполняются проектирование конструкции изделия, изготовление

и испытания опытных образцов, технологическая подготовка производства. На стадии производства (manufacturing) осуществляется изготовление изделий, предназначенных для поставки заказчикам (серийных изделий). На стадии эксплуатации (operation) реализуется, поддерживается и восстанавливается качество изделия. Эта стадия включает в общем случае использование по назначению, транспортирование и техническую эксплуатацию: хранение, техническое обслуживание и все виды ремонта, кроме тех, которые выполняются на условиях временного вывода изделия из эксплуатации, например, капитальный ремонт. На стадии утилизации (disposal) осуществляется изменение целевого назначения или уничтожение изделий по причине невозможности или нецелесообразности их дальнейшего применения по основному назначению с обеспечением возможности вторичного использования таких изделий либо материалов, полученных при их уничтожении (разборке) [12].

Данный подход был использован с целью описания стадий жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком (табл. 1).

На каждой стадии жизненного цикла изделия формируются информационные потоки, которые обеспечивают систему управления исходными данными (факторами) и целевыми установками (функциями отклика).

Повышение эффективности обработки абразивным потоком возможно за счет управления факторами стадий жизненного цикла рабочей среды. Для каждой стадии жизненного цикла определяется набор факторов и функций отклика. На следующей стадии функции отклика предыдущей стадии становятся факторами (исходными данными).

Выделение в жизненном цикле инструмента стадии разработки предусматривает формирование уровня, соответствующего современным достижениям науки и производственного опыта, прогнозу потребностей промышленности на период производства рабочей среды, а также подготовку комплекта технической и нормативной документации для изготовления, обращения и эксплуатации инструмента при установленных экономических показателях. Достижение целей на каждой стадии предусматривается при максимальной эффективности. Необходимо обеспечить выполнение технического задания при заданной степени надежности инструмента и минимизации материальных и временных затрат. Понятие эффективности включает в себя снижение себестоимости и сроков изготовления рабочей среды, а также сроков внедрения в производство конкретных деталей.

Разработке этой стадии жизненного цикла посвящено большинство публикаций. Первоначально при создании рабочей среды для обработки абразивным потоком учитывались такие факторы, как зернистость и весовое содержание абразивного наполнителя среды, объем и температура среды, сдвигающее давление в рабочих цилиндрах установки. Эти факторы, соответственно, определяли эффективную вязкость среды и скорость потока среды [13]. Используя эти значения как факторы на следующей стадии жизненного цикла, экспериментально определялись зависимости шероховатости обработанной поверхности и величины удаляемого материала в единицу времени. При этом учитывалось влияние на процесс обработки таких переменных, как твердость и обрабатываемость материала, а также исходная шероховатость обрабатываемой поверхности.

Далее были проведены исследования влияния таких факторов, как L – длина обрабатываемого капилляра, P – давление внутри потока, Q – объемный расход среды, r – радиус обрабатываемого капилляра, t – время обработки, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига потока среды, η – вязкость среды, τ – напряжение сдвига среды [14]. В данной работе впервые рабочая среда исследовалась с применением капиллярного реометра. Это позволило установить ряд качественных зависимостей. Например, увеличение вязкости рабочей среды приводит к увеличению перепада давлений на входе и выходе обрабатываемого канала. Зернистость наполнителя несущественно влияет на вязкость среды, а температура – наоборот.

Таблица 1

Описание жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком

Жизненный цикл рабочей среды		Методы получения исходных данных
Стадия	Этап	
Разработка (исследование и проектирование)	Начальный	Теоретические и лабораторные исследования
	Предпроектный	
	Проектный	
	Заключительный	Анализ учетной документации. Лабораторные испытания
Изготовление	Опытная партия	Предложения и замечания изготовителя (производственные испытания)
	Установочная серия	Определение себестоимости изготовления (производственные наблюдения)
	Серийное и/или массовое производство	Анализ учетной документации и отбраковка
Эксплуатация	Внедрение на отдельном рабочем месте	Производственные испытания
	Внедрение на отдельной операции	Производственные наблюдения
	Массовая эксплуатация	Анализ учетной документации и отбраковка
Утилизация	Сбор и сортировка отходов	Анализ учетной документации и переработка отходов
	Переработка отходов	
Интегральная оценка качества инструмента		Анализ учетной информации по всем стадиям жизненного цикла

Для исследования тепловых свойств рабочей среды, представляющей собой смесь полиборосилоксана и абразива карбида кремния, было предложено увеличить число факторов. Были добавлены такие факторы, как C_p – удельная теплоемкость (Дж/кг K), D – диаметр экспериментальной установки (м), h – коэффициент поверхностной теплопередачи (Вт/м^2 · K), L, l – длина цилиндра (экспериментальной установки) (м), $\dot{q}$ – поток тепловой энергии (Вт), S – фактор (коэффициент) формы, v – объемная фракция (доля) (безразмерный), λ – теплопроводность (Вт/м · K) [15].

При моделировании обработки абразивным потоком с использованием нейронной сети [16] перечень был дополнен таким фактором, как состояние рабочей среды (режущая способность, уровень загрязнения). Важным дополнением в моделировании процесса стало предложение учитывать влияние формы обрабатываемого канала: круглая, щелевая, постоянная, переменная, профильная и др. [17].

Для моделирования поверхности, создаваемой в процессе обработки абразивным потоком, были предложены обозначения факторов, которые для обработки абразивным потоком стали общепринятыми [3; 18; 19]. Эти факторы можно распределить по группам.

Для описания обрабатываемой детали применимы такие факторы, как b – размер поперченного сечения (m), H_w – твердость материала обрабатываемой детали (MPa), l_w и r_w – длина и радиус обрабатываемого канала (m), E_m – модуль упругости материала заготовки (kg/mm^2), $R^o{}_a$ и R_a – начальная и конечная шероховатость поверхности (mm), a – угол между нормалью к входному сечению заготовки и ее центральной осью.

Для описания рабочей среды применимы такие факторы, как C – процентное содержание абразива в среде по весу, d_g и r_g – диаметр и радиус абразивного зерна (m), M – зернистость (дисперсность) абразивного зерна, V_a – объем абразива (m^3), ρ_a – плотность абразива (kg/m^3), ρ_c – плотность носителя (полимерной основы среды) (kg/m^3), ρ_m – плотность среды (в целом) (kg/m^3), σ_r – стандартное распределение радиусов абразивных зерен, η_a – кажущаяся вязкость рабочей предел текучести материала (N/m^2), σ – одноосное среды (Pa · s), η_o – нулевое значение η_a, σ_o – начальныйнапряжение потока материала (kg/mm^2).

Для описания режимов обработки применимы такие факторы, как T – время обработки (s), N – количество циклов обработки, n – номер цикла обработки, p – давление сдвига (экструзии) (MPa), p_n – воздействие давления на абразивные зерна по нормали (MPa), r_c – радиус рабочих цилиндров установки (m), v_f – скорость течения среды в заготовке (m/s), v_p – скорость поршня или скорость потока среды на входе (в обрабатываемый канал) (m/s), v_i – компоненты вектора скорости, V – общий объем удаленного материала (m^3), V_i – объем материала, удаленного на i-м цикле (m^3).

Для описания контактных взаимодействий применимы такие факторы, как A – площадь контакта (mm^2), μ – предполагаемый коэффициент трения между абразивным зерном и материалом заготовки, $\bar{\sigma}$ – среднее напряжение на площади контакта (kg/mm^2), t – глубина вдавливания (внедрения) зерна в материал заготовки (m), C – коэффициент ограничения потока, a_i – радиус пятна контакта при внедрении зерна (m), f – средний коэффициент трения, l_s – длина контакта (m), L_i – актуальная длина контакта в i-м цикле (m), N – количество абразивных зерен, действующих на единицу площади контакта среды и заготовки (mm^2), σ_r – нормальное напряжение (N/m^2), σ_{ij} – тензор напряжения, $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – тензор скорости деформации, τ_{ij} – девиаторный компонент напряжения.

Для описания сил, возникающих при контактных взаимодействиях, применимы такие факторы, как F_n – сила, направленная по нормали к абразивному зерну (N), F – осевая сила (N), F_{ng} – радиальная сила (N), F_R – результирующая (суммарная) сила (N), F'_{ng} – общая нормальная нагрузка на одно абразивное зерно (N), F_{ap} – осевая сила, возникающая только при деформации полимерной основы среды (N), F_{rp} – радиальная сила, возникающая только при деформации полимерной основы среды (N), F_r – сила трения (N), F_{rm} – измеренная радиальная сила, возникающая при воздействии рабочей среды (N), F_{am} – измеренная радиальная сила, возникающая при воздействии рабочей среды (N).

Начальный этап первой стадии жизненного цикла рабочей среды заключается в анализе требований рабочих чертежей детали и заготовки, приведенном в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Анализ канала детали при обработке абразивным потоком

Канал	Характеристика	Рекомендации
Тип	Внутренний	Использование приспособления для закрепления в рабочих цилиндрах
	Внешний	Использование приспособления для закрепления в рабочих цилиндрах и создания камеры обработки (формирования внешней стенки обрабатываемого канала)
Количество	Единичный	Создание условий для плавного перехода потока среды от рабочего цилиндра к входному отверстию канала
	Два и более	Создание условий для плавного перехода потока среды от рабочего цилиндра к входным отверстиям каналов и равномерного расхода среды во всех каналах
Угол между осями входного отверстия и рабочего цилиндра	Нулевой	Использование обычного приспособления
	Ненулевой	Создание условий для выравнивания потока среды на входе (направляющие аппараты)

Окончание табл. 2

Канал	Характеристика	Рекомендации
Отношение длины l и площади поперечного сечения b	$l \leq b$	Использование рабочих сред повышенной вязкости
	$l > b$	Использование рабочих сред повышенной и обычной вязкости
	$l >> b$	Использование рабочих сред низкой вязкости с добавлением пластификаторов
Форма поперечного сечения	Постоянная	Использование обычного приспособления
	Переменная	Использование выравнивающих устройств

Таблица 3

Анализ поверхностного слоя детали при обработке абразивным потоком

Поверхность	Характеристика	Рекомендации
Шероховатость	Исходная	Выбор состава рабочей среды (вязкость, зернистость, тип наполнителя)
	Конечная	Определение количества циклов обработки и давления в рабочих цилиндрах
Твердость и модуль упругости материала	Термически обработанные	Выбор состава рабочей среды (высокая вязкость и зернистость), большие давления рабочих цилиндров, охлаждение среды в процессе обработки
	«Сырые»	Выбор состава рабочей среды (обычная вязкость и зернистость), средние давления рабочих цилиндров
Материал	Сплавы на основе меди и цинка	Выбор состава рабочей среды (вязкость, зернистость, тип наполнителя). Определение количества циклов обработки и давления в рабочих цилиндрах
	Алюминиевые и титановые сплавы	
	Низкоуглеродистые и углеродистые стали	
	Легированные и высоколегированные стали	
	Керамика	
	Резины, полимеры, стекла	

Предпроектный этап первой стадии жизненного цикла рабочей среды направлен на разработку плана проведения экспериментальных исследований эмпирических зависимостей режимов обработки абразивным потоком с факторами обрабатываемого канала (каналов) и его поверхностного слоя. Для разных типов деталей и материалов применяются свои подходы, но предприняты попытки предложить универсальные методики [10; 11].

В результате исследований определяется состав рабочей среды и режимы обработки. Важным показателем эффективности исследования является наличие зависимостей, связывающих такие ключевые характеристики рабочей среды, как плотность среды ρ_m и ее кажущаяся вязкость η_a, с процентным содержанием абразива в среде по весу и его зернистостью. Особое внимание уделяется составу носителя (полимерной основы), от которого во многом зависят вязкоупругие свойства потока рабочей среды. В завершение проектного этапа исследовательской стадии формируется спецификация на создание рабочей среды, которая обеспечит требуемые значения контактных взаимодействий между абразивными зернами потока среды и микронеровностями обрабатываемой поверхности.

Для стадии изготовления жизненного цикла рабочей среды наибольшие затраты приходятся на создание опытной партии. Промышленные компании и университеты, занимающиеся изготовлением рабочих сред для обработки абразивным потоком, не раскрывают свои технологии.

Однако можно отметить, что первоначально подготавливается полимерная основа (носитель). В зависимости от требуемой вязкости подбирается тип полимера и возможные модификаторы. Для снижения вязкости в полимер вводят различные пластификаторы. Для снижения адгезии, вызванной наличием в невулканизированных полимерах активных радикалов, в состав вводятся «ингибиторы». Например, при термомеханическом смешивании полимера с порошками фторопласта и слюды активные радикалы полимера связываются с активными элементами порошков. После определенной временной выдержки и возможного введения в состав дополнительных пластификаторов или поверхностно-активных веществ, основу рабочей среды перемешивают с абразивным наполнителем.

Обязательным условием для опытной партии является тестирование рабочей среды на ее стойкость, которая зависит от двух факторов. Основное влияние на стойкость среды оказывает постепенное накопление в ее составе частиц обрабатываемых материалов. Эти частицы становятся частью обрабатываемого инструмента. Они могут участвовать в контактных взаимодействиях с обрабатываемой деталью или частицами абразива. При определенном значении начинается процесс деструкции рабочей среды. Полимерный носитель теряет свойства закрепления единичного абразивного зерна в потоке, что негативно влияет на режущие свойства рабочей среды. Второй фактор – это нагрев рабочей среды во время обработки. С увеличением температуры среды ее вязкость уменьшается, что влияет на режимы обработки. Степень влияния нагрева на вязкость среды можно оценивать разными методами [2]. При значительном нагреве рабочей среды может наступить термическая деструкция полимерной основы.

При разработке опытной и установочных партий рабочей среды учитываются режимы технологии

обработки абразивным потоком. Эти режимы будут использоваться на следующей стадии жизненного цикла рабочей среды – стадии эксплуатации. Также учитывается радиус и объем рабочих цилиндров установки, от которых зависит объем среды, используемый для обработки.

На этой стадии уточняются такие факторы, как время обработки T и количество циклов обработки N, а также давление сдвига (экструзии) p. Давление сдвига определяет скорость поршня или скорость потока среды на входе (в обрабатываемый канал) v_p. От давления сдвига, состава рабочей среды и геометрической характеристики обрабатываемого канала зависит скорость течения среды в заготовке v_i, а также величина давления потока рабочей среды на поверхность обрабатываемого канала.

Примером успешного внедрения на отдельной операции и массовой эксплуатации можно назвать применение операции обработки абразивным потоком для финишной обработки профилирующих матриц в металлургическом производстве.

Стадия утилизации рабочей среды заключается в сборе остатков рабочей среды с последующей сортировкой. Особое внимание уделяется рабочим средам, которые участвовали в обработке ценных материалов. В этом случае остатки подвергаются химической или термохимической деструкции с последующим сепарированием отходов и разделением фракций абразивных зерен и микрочастиц ценных материалов. Случаи повторного использования рабочих сред для обработки абразивным потоком литературно не зафиксированы.

Интегральная оценка качества рабочей среды как инструмента для обработки абразивным потоком позволяет внести корректировки в существующие зависимости, связывающие факторы различных стадий жизненного цикла рабочей среды.

Описанный выше подход, при котором для каждой стадии жизненного цикла определяется набор факторов и функций отклика, которые, в свою очередь, на следующей стадии становятся факторами, позволяет повысить эффективность обработки абразивным потоком за счет снижения затрат на подготовку производства и эксплуатацию рабочей среды.

Этот факт особенно важен для производства ракетно-космической техники, характеризующейся широкой номенклатуры деталей с различными видами поверхностей, которые требуют операции финишной обработки.

Заключение. В статье предложен подход, при котором для каждой стадии жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком определяется набор факторов и функций отклика. На следующей стадии жизненного цикла функции отклика предыдущей стадии становятся факторами (исходными данными).

Анализ публикаций показал, что в них отсутствует систематизированное описание факторов технологического процесса обработки абразивным потоком на разных стадиях жизненного цикла.

В работе предпринята попытка систематизировать переменные данной технологии и установить их взаимосвязь через этапы жизненного цикла рабочей среды как инструмента финишной обработки.

Приведено описание жизненного цикла рабочей среды для обработки абразивным потоком. Жизненный цикл включает в себя пять стадий, разделенных на тринадцать этапов. На основе анализа мирового опыта для каждого этапа предложен набор факторов, позволяющих дать характеристику обрабатываемой детали, рабочей среды, режимов обработки, а также контактных взаимодействий между абразивным зерном и обрабатываемой поверхностью.

Описанный в статье подход позволяет повысить эффективность обработки абразивным потоком за счет снижения затрат на подготовку производства и эксплуатацию рабочей среды, что особенно важно для производства ракетно-космической техники.

Библиографические ссылки

1. Larry Rhoades. Abrasive flow machining a case study // Journal of Materials Processing Technology. 1991. Vol. 28, iss. 1–2. P. 107–116.
2. Левко В. А. Абразивно-экструзионная обработка. Современный уровень и теоретические основы процесса : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007.
3. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining // Wear. 2006. Vol. 260, iss. 1–2. P. 128–139.
4. Zhong Ming Xu, Yong Wu Luo. Study on the Influence of Geometrical Parameters of Abrasive Grains in Abrasive Flow Machining // Advanced Materials Research. 2010. Vol. 135. P. 52–57.
5. Ke Hua Zhang, Jin Fu Ding, Yong Chao Xu. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM) // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 797. P. 390–395.
6. Левко В. А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // Металлообработка. 2008. № 3. С. 19–23.
7. Levko V. A. Calculation of surface roughness in abrasive-extrusion machining on the basis of contact-interaction model // Russian Aeronautics. 2009. Vol. 52, № 1. С. 94–98.
8. Mali H. S., Manna A. Current status and application of abrasive flow finishing processes : A review // Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture. 2009. Vol. 223. P. 809–820.
9. Developments in abrasive flow machining: a review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media / M. S. Cheema [et al.] // Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture. 2012. Vol. 226, iss. 12. P. 1951–1962.
10. Методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко [и др.] // Вестник СибГАУ. 2011. № 4 (37). С. 173–178.
11. Mitchell Howard, Kai Cheng. An industrially feasible approach to process optimisation of abrasive flow machining and its implementation perspectives // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture. 2013. Vol. 227. № 11. P. 1748–1752.

12. ГОСТ Р 56136–2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения.

13. Pat. 3634973 US. Apparatus for abrading by extrusion and abrading medium / McCarty R. W. 27.08.1969 ; 18.01.1972. Vol. 894. № 3.

14. Davies P. J., Fletcher A. J. The Assessment of the Rheological Characteristics of Various Polyborosiloxane/ Grit Mixtures as Utilized in the Abrasive Flow Machining Process // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C. Journal of Mechanical Engineering Science. 1995. Vol. 209. P. 409–418.

15. Fletcher A. J., Fioravanti A. Polishing and Honing Processes: An Investigation of the Thermal Properties of Mixtures of Polyborosiloxane and Silicon Carbide Abrasive // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C. Journal of Mechanical Engineering Science. 1996. Vol. 210. P. 255–265.

16. Smith A. E., Slaughter W. S. Neural Network Modeling of Abrasive Flow Machining // Proceedings of the Advanced Technology Program Motor Vehicle Manufacturing Technology Public Workshop. NIST Document NISTIR 6079. Ann Arbor, MI, 1997. P. 151–158.

17. Petri K., Billo R., Bidanda B. A neural network process model for abrasive flow machining operations // Journal of Manufacturing Systems. 1998. Vol. 17, iss. 1. P. 52–64.

18. Jain R. K., Jain V. K. Simulation of surface generated in abrasive flow machining process // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 1999. Vol. 15, iss. 5. P. 403–412.

19. Jain R. K., Jain V. K., Dixit P. M. Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1999. Vol. 39, iss. 12. P. 1903–1923.

References

1. Larry Rhoades. Abrasive flow machining a case study. *Journal of Materials Processing Technology.* 1991, Vol. 28, Iss. 1–2, P. 107–116.

2. Levko V. A. *Abrazivno-ekstruzionnaya obrabotka. Sovremennyy uroven' i teoreticheskie osnovy protsessa: monografiya* [Abrasive flow machining. Modern level and theoretical bases of the process: monograph]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2007.

3. Gorana V. K., Jain V. K., Lal G. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. *Wear.* 2006, Vol. 260, Iss. 1–2, P. 128–139.

4. Zhong Ming Xu, Yong Wu Luo. Study on the Influence of Geometrical Parameters of Abrasive Grains in Abrasive Flow Machining. *Advanced Materials Research.* 2010, Vol. 135, P. 52–57.

5. Ke Hua Zhang, Jin Fu Ding, Yong Chao Xu. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM). *Advanced Materials Research.* 2013, Vol. 797, P. 390–395.

6. Levko V. A. [Contact processes in abrasive flow machining]. *Metalloobrabotka.* 2008, No. 3, P. 19–23 (In Russ.).

7. Levko V. A. Calculation of surface roughness in abrasive-extrusion machining on the basis of contact-interaction model. *Russian Aeronautics.* 2009, Vol. 52, No. 1, P. 94–98.

8. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review / H. S. Mali, A. Manna. *Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2009, Vol. 223, P. 809–820.

9. Cheema M. S., Venkatesh G., Dvivedi A., Sharma A. K. Developments in abrasive flow machining: a review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media. *Journals Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.* Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2012, Vol. 226, No. 12, P. 1951–1962.

10. Levko V. A., Lubnin M. A., Sysoev S. K., Sysoev A. S., Sysoeva L. P. [Method for assessing the accuracy, quality and efficiency of abrasive flow machining of parts]. *Vestnik SibGAU.* 2011, No. 4 (37), P. 173–178 (In Russ.).

11. Mitchell Howard, Kai Cheng. An industrially feasible approach to process optimisation of abrasive flow machining and its implementation perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.* 2013, Vol. 227, No. 11, P. 1748–1752.

12. GOST R 56136–2014. Life-cycle management of military products. Terms and Definitions.

13. Pat. 3634973 US, Apparatus for abrading by extrusion and abrading medium / McCarty R. W. 27.08.1969; 18.01.1972, Vol. 894, No. 3.

14. Davies P. J., Fletcher A. J. The Assessment of the Rheological Characteristics of Various Polyborosiloxane/ Grit Mixtures as Utilized in the Abrasive Flow Machining Process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.* Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 1995, Vol. 209, P. 409–418.

15. Fletcher A. J., Fioravanti A. Polishing and Honing Processes: An Investigation of the Thermal Properties of Mixtures of Polyborosiloxane and Silicon Carbide Abrasive. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 1996, Vol. 210, P 255–265.

16. Smith A. E., Slaughter W. S. Neural Network Modeling of Abrasive Flow Machining. *Proceedings of the Advanced Technology Program Motor Vehicle Manufacturing Technology Public Workshop*. NIST Document NISTIR 6079, Ann Arbor, MI, October 1997, P. 151–158.

17. Petri K., Billo R., Bidanda B. A neural network process model for abrasive flow machining operations. *Journal of Manufacturing Systems*. 1998, Vol. 17, Iss. 1, P. 52–64.

18. Jain R. K., Jain V. K. Simulation of surface generated in abrasive flow machining process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 1999, Vol. 15, Iss. 5, P. 403–412.

19. Jain R. K., Jain V. K., Dixit P. M. Modeling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 1999, Vol. 39, Iss. 12, P. 1903–1923.

© Левко В. А., Симакова А. Е., Савин Д. И., 2017

УДК 544.18

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 939–948

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ФАЗ СИЛИЦИДОВ МАРГАНЦА НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ (001)

Т. А. Лубкова[1], А. А. Бычек[2], З. И. Попов[3, 4*], И. В. Чепкасов[5], М. А. Высотин[1, 2, 4]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[3]Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4
[4]Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38
[5]Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова
Российская Федерация, 655017, г. Абакан, просп. Ленина, 90
[*]E-mail: zipcool@bk.ru

Необходимость уменьшения массы и размеров электронных приборов и вместе с тем увеличения их быстродействия и энергоэффективности наиболее остро выражена в сфере космического приборостроения. Один из возможных путей развития электроники в этом направлении – переход к устройствам, базирующимся на новых физических принципах, таких как манипулирование спином электрона. Поиск новых материалов для таких устройств требует привлечения новых подходов в рамках современного материаловедения, включая использование методов теоретического предсказания соединений для их дальнейшего экспериментального синтеза и изучения.

Перспективная для спинтроники система Mn–Si является серьёзным вызовом для теоретических исследований из-за своей запутанной фазовой диаграммы с большим количеством метастабильных фаз, многие из которых обнаруживаются только в определённых наноразмерных системах, таких как тонкие пленки. Представлен поиск и исследование новых фаз силицидов марганца, образование которых возможно при эпитаксиальном росте на поверхности кремния (001). Исследование проводилось при помощи квантово-химического моделирования с использованием эволюционного алгоритма поиска стабильных структур и расчетов в рамках теории функционала электронной плотности. Из всего разнообразия обнаруженных фаз наибольшим магнитным моментом – 0,71 μ_B на атом марганца, обладает тетрагональная P4/mmm-фаза дисилицида марганца. Для этой фазы были рассмотрены различные конфигурации интерфейсов с кристаллическим кремнием, определены их электронные и магнитные свойства. Высокое значение спиновой поляризации на уровне Ферми (–66 %) говорит о перспективности пленок такого силицида для спинтронных устройств. Выявлено влияние конечной толщины плёнки на магнитные моменты атомов марганца, вплоть до исчезновения спиновой поляризации. Показано, что наличие интерфейса с кремниевой подложкой существенно сказывается только на ближайшем к нему слое силицида, в то время как оборванные связи на поверхностном слое силицида распространяют свое влияние на электронную структуру 2–3 слоев вглубь силицида, что позволяет говорить о сохранении магнитных свойств пленок найденного силицида при их малой толщине, начиная с нескольких нанометров.

Ключевые слова: силициды, квантово-химические расчеты, спинтроника, силициды марганца, интерфейс, эпитаксиальный рост.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 939–948

THEORETICAL SEARCH AND INVESTIGATION OF MAGNETIC MANGANESE SILICIDE PHASES ON SI (001) SURFACE

T. A. Lubkova[1], A. A. Bychek[2], Z. I. Popov[3, 4*], I. V. Chepkasov[5], M. A. Visotin[1, 2, 4]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[3]The National University of Science and Technology “MISiS”
4, Leninsky Av., Moscow, 119049, Russian Federation

[4]Kirensky Institute of Physics SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation
[5]Katanov Khakas State University
90, Lenin Av., Abakan, 655017, Russian Federation
[*]E-mail: zipcool@bk.ru

Necessity to reduce the mass and dimensions of electronic devices, and at the same time, increasing their performance and energy efficiency, is most pronounced in the field of space device engineering. One possible approach is to develop electronics based on new physical principles, such as manipulating electron spins. The search for materials for such devices requires new strategies within the framework of modern material science, including utilization of methods for theoretical prediction of compounds prospective for their further experimental synthesis and study.

One of promising spintronics material families, the Mn–Si system, is a serious challenge for theoretical studies because of its entangled phase diagram with a large number of metastable phases, many of which are found only in certain nanoscale systems such as thin films. The article presents a search and investigation of new manganese silicide phases that can form epitaxial thin films on (001) surface of silicon. This theoretical study was carried out using the evolutionary algorithm for stable structure prediction and is based on the calculations within the framework of the density functional theory. Among the found phases, the tetragonal P4/mmm phase of manganese disilicide has the largest magnetic moment of 0.71 μB per manganese atom.

For this phase various configurations of interfaces with crystalline silicon were modeled and their electronic and magnetic properties were determined. High value of spin polarization at the Fermi level (–66 %) indicates the silicide's great potential for spintronics applications. Additionally, the effect of the finite film thickness on the magnetic moments on manganese atoms, up to the suppression of the spin polarization, is revealed. It is shown that the presence of an interface with a silicon substrate significantly affects only the nearest disilicide layer, while the dangling bonds on the disilicide film surface have influence on the electronic structure of 2–3 layers deep into the silicide. This argues for the preservation of the magnetic properties in the disilicide films despite their small thickness starting from several nanometers.

Keywords: silicides, quantum-chemical calculations, spintronics, manganese silicide, interface, epitaxial growth.

Введение. Непроходящий интерес к исследованию сверхтонких эпитаксиальных плёнок на поверхности кремния связан с тем, что в материалах данного класса наиболее ярко проявляется взаимосвязь оптических, электронных и магнитных свойств [1; 2], а также с их перспективностью с точки зрения микроэлектроники, фотовольтаики, оптоэлектроники и термоэлектрических материалов [3–6]. Кроме того, данные планарные гетероструктуры представляют большой интерес для спинтроники [7]. Проектирование эффективно работающих приборов спинтроники требует использования материалов, отвечающих ряду требований: устойчивость к внешним воздействиям, интеграция с современной кремниевой электроникой, большое время спиновой когерентности, высокая подвижность носителей [8]. Соответственно, наиболее привлекательной и реалистичной представляется идея создания сверхтонких гибридных гетероструктур «ферромагнитный металл / полупроводник», где в роли полупроводника используется кремний [9–12], который обладает слабым спин-орбитальным взаимодействием, что обеспечивает большое время жизни спинового состояния и, соответственно, большую длину спиновой диффузии.

В последние годы особое внимание заслужили силициды марганца и их тонкие плёнки. Эти соединения представляют интерес не только с практической, но и с фундаментальной точки зрения: ни кремний, ни марганец в чистом виде не являются ферромагнетиками, однако их сплав является ферромагнетиком уже при комнатной температуре. При этом было обнаружено, что тонкие плёнки силицида марганца обладают ферромагнетизмом с температурой Кюри выше 400 K, что гораздо выше, чем у любой из известных объёмных фаз [13]. Тем не менее, механизм возникновения ферромагнитного упорядочения в магнитных полупроводниках, к которым относятся и высшие силицида марганца $MnSi_{1,75}$, до сих пор до конца не выяснен [14].

Соединения Mn–Si обладают весьма запутанной фазовой диаграммой и большим количеством метастабильных фаз, многие из которых обнаруживаются только в определённых наноразмерных системах [15; 16]. Наряду с этим, сжатие или растяжение решётки силицида, вызванное подложкой, на которой осуществляется эпитаксиальный рост тонкой плёнки, может приводить к значительному изменению магнитных свойств [17]. Тем не менее, структура интерфейсов $Mn_{(1-x)}Si_x$/Si и процессы, происходящие в них, остаются малоизученными. Ситуация осложняется ещё и тем, что рост сверхтонких плёнок марганца и его силицидов очень чувствителен ко многим деталям эксперимента, что иногда приводит к весьма противоречивым результатам при анализе структуры области интерфейса [18; 19]. В связи с этим использование теоретического квантово-химического моделирования может внести неоценимый вклад в понимание взаимосвязи структурных, электронных и магнитных свойств данных систем. Ранее, на примере моносилицида железа на поверхности кремния, было показано, что использование первопринципных расчётов дает хорошее согласие с экспериментальными данными при определении наиболее выгодной структуры интерфейса и его свойств [20].

В настоящей работе представлен теоретический поиск метастабильных фаз силицидов марганца,

которые могут расти эпитаксиально на поверхности (001) кремния. Для найденной ферромагнитной фазы дисилицида были определены электронные и магнитные свойства, а также структура интерфейса с поверхностью Si (001).

Методы расчета. Все расчеты полной энергии новых фаз, а также оптимизация геометрии плёнок и интерфейсов, осуществлялись в лицензионном программном пакете VASP 5.3 (Vienna Ab-initio Simulation Package) [21–23] в рамках метода функционала плотности (DFT) [24; 25] с использованием базиса плоских волн и PAW-формализма [26; 27]. Вычисления проведены в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA) с обменно-корреляционным функционалом PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) [28]. Энергия обрезания базиса плоских волн E_{cutoff} равнялась 300 эВ. Сэмплирование обратной зоны Бриллюэна производилось по схеме Монхорста–Пака [29] с шагом не более 0,046 $Å^{-1}$.

Для поиска новых фаз, образование которых возможно на поверхности (001) кремния, в данной работе использовался оригинальный подход. В его основе лежит хорошо зарекомендовавший себя метод нахождения новых фаз с помощью эволюционного алгоритма предсказания новых структур Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography (USPEX) [30–32], основывающегося на результатах квантово-химических расчётов. При этом во время поиска были наложены ограничения на размеры расчётной ячейки по двум осям, что позволило искать эпитаксиальные фазы, т. е. с наименьшим расхождением по параметрам решётки с поверхностью кремния.

С помощью эволюционного алгоритма USPEX был произведен поиск фаз в системе Mn_xSi_y, при этом только один из параметров решетки менялся свободно, а два других были зафиксированы на величинах 10,900 и 5,450 Å, что соответствует суперячейке 2×1 поверхности Si (001). Поиск был ограничен составами $x + y \preceq 20$.

Для оценки стабильности новых структур была рассчитана энергия их образования на один атом:

$$E_{form} = [E(Mn_xSi_y) - x \cdot E_{epitax}(Mn) - y \cdot E(Si)] / (x + y) \quad (1)$$

где E(Si) – энергия связи в кристалле кремния; E_{epitax}(Mn) – энергия связи в эпитаксиальной фазе марганца, найденной также с помощью алгоритма USPEX.

На основе данной величины была построена выпуклая оболочка множества энергий структур переменного состава, которая указывает на структуры, термодинамически стабильные по отношению к разделению на несколько других фаз. Результаты поиска структур представлены на рис. 1.

Для наиболее стабильных фаз была определена электронная и магнитная структуры, включая суммарный магнитный момент в пересчете на 1 атом марганца M_{Mn}. Результаты представлены в табл. 1.

В процессе поиска была обнаружена эпитаксиальная фаза марганца, обладающая тетрагональной сингонией пространственной группы $P4_2/mnm$ с параметрами элементарной ячейки $a = b = 3{,}854$ Å, $c = 2{,}778$ Å. Однако энергия образования данной фазы в объеме на 0,117 эВ/атом выше альфа-фазы марганца, и, соответственно, рост данной фазы может происходить только в сильно неравновесных условиях, например, в процессе напыления сверхтонких плёнок на подложку Si (001).

Также выявлена тенденция к увеличению среднего значения магнитного момента атомов марганца в решетке силицидов Mn_xSi_y по мере уменьшения отношения $x{:}y$.

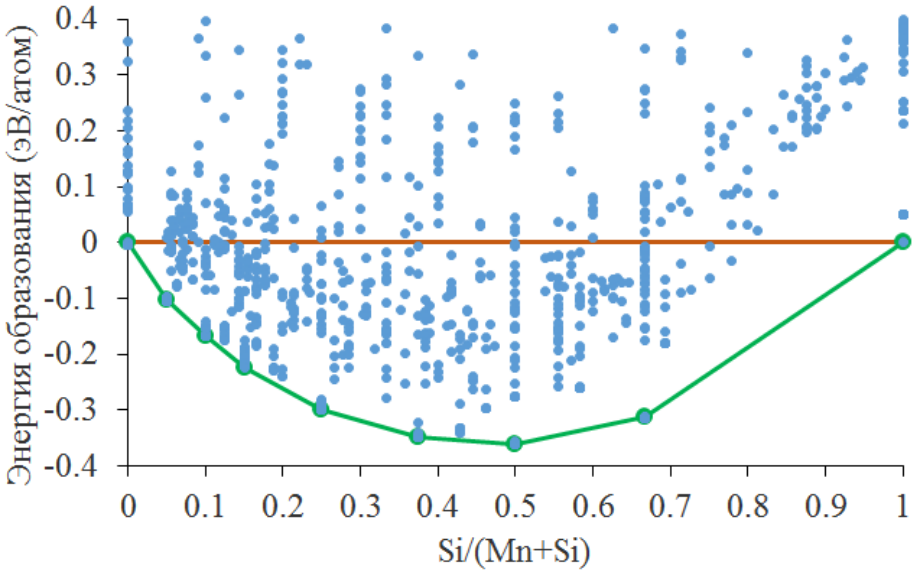


Рис. 1. Выпуклая оболочка множества энергий структур переменного состава Mn_xSi_y, найденных с помощью USPEX

Fig. 1. Convex shell of energy sets of variable composition structure Mn_xSi_y, found with the help of USPEX

Таблица 1

Найденные эпитаксиальные фазы Mn_xSi_y

Состав	x в $Mn_{(1-x)}Si_x$	E_{form}, эВ	M_{Mn}, μ_B
Mn_{16}	0,000	–	0,00
$Mn_{19}Si$	0,050	–0,098	0,02
$Mn_{18}Si_2$	0,100	–0,163	0,17
$Mn_{17}Si_3$	0,150	–0,224	0,09
$Mn_{12}Si_4$	0,250	–0,283	0,15
$Mn_{10}Si_6$	0,375	–0,341	0,22
Mn_7Si_7	0,500	–0,357	0,20
Mn_4Si_8	0,670	–0,311	0,71

С помощью анализа локального окружения атомов (Common Neighbor Analysis [33]) было показано, что в найденных фазах $Mn_{19}Si$, $Mn_{18}Si_2$ и $Mn_{17}Si_3$ атомы располагаются в узлах гранецентрированной кубической (ГЦК) решётки и являются, по сути, одной и той же фазой гамма-марганца с замещением некоторых атомов на кремний. При этом данная фаза располагается в расчетной ячейке так, что направление (001) ГЦК-решетки совпадало с осью ячейки z (размер ячейки, вдоль которой он не был фиксирован и мог изменяться), а оси x и y оказались направлены вдоль направлений (310) и (–130) ГЦК-решетки. Магнитные моменты на атомах Mn, располагавшихся в разных атомных слоях, перпендикулярных оси z, были противоположно направлены, что согласуется с показанным ранее антиферромагнитным порядком в ГЦК-фазе марганца [34]. Следствием такого упорядочения является низкий суммарный магнитный момент на ячейку в этих трех фазах (< 0,17 μ_B) при ненулевом моменте на атомах марганца (1–1,5 μ_B).

Другие найденные структуры силицидов $Mn_{12}Si_4$, $Mn_{10}Si_6$, Mn_7Si_7, Mn_4Si_8 имеют схожую между собой структуру, в которой вдоль оси z происходит чередование двух слоев: в одном слое (A) находятся только атомы Mn, в другом слое (B) – атомы Si и Mn. При этом внутри слоя атомы располагаются в узлах квадратной решетки (период её равен 2,725 Å = 5,450/2 Å). Было обнаружено, что наибольшими магнитными моментами обладают атомы Mn, расположенные в слоях B (1,7–2,2 μ_B), в то время как атомы марганца слоев A имеют противоположный знак магнитного момента (–0,3 … –0,5 μ_B).

Найденная нами фаза дисилицида марганца (Mn_4Si_8) имеет тетрагональную симметрию группы P4/mmm с элементарной ячейкой размерами $a = b =$ = 2,758 Å, c = 5,128 Å, содержащей 1 атом марганца и 2 атома кремния. Данная фаза располагается в расчетной ячейке (10,900 Å × 5,450 Å) осями c и a вдоль осей x и y соответственно. При этом вдоль направления z имеет место чередование слоя только марганца (с половинным заполнением узлов квадратной решетки) и слоя только кремния, в результате чего все атомы Mn имеют сонаправленный магнитный момент. Среди найденных нами эпитаксиальных фаз эта фаза единственная, в которой имеется ферромагнитное упорядочение, а средний магнитный момент атомов марганца в ней максимален. Кроме того, она обладает значительной спиновой поляризацией (–66 %), рассчитанной из соотношения вкладов плотностей состояний (Density of States, DOS) в области уровня Ферми (рис. 2), что может представлять большой интерес для спинтроники. Соответственно, дальнейшие исследования были сконцентрированы на изучении этой фазы и её интерфейсов с поверхностью кремния.

Исследование структуры интерфейса Mn_4Si_8/Si (001). Для тонких пленок большое значение имеет не только структура интерфейса между пленкой и подложкой, но и поверхность самой пленки. Поэтому, прежде чем приступить к построению модели интерфейса, необходимо определить наиболее энергетически выгодное строение поверхности тонкой пленки. Предполагая гладкую, нешероховатую плёнку, рассчитывалась поверхность (100) дисилицида, которая соответствует плоскости xy расчётной ячейки (10,900 Å × × 5,450 Å), параллельной плоскости предполагаемой подложки. В направлении (100) найденной фазы дисилицида происходит описанное выше чередование слоёв, поэтому были рассмотрены варианты, когда поверхность пленки силицида покрывает слой A, содержащий только атомы марганца, или слой B, содержащий атомы кремния. Для этого были проведены полные оптимизации геометрий и рассчитаны энергии образования E_{form} пластин дисилицида, состоящих из семи атомных слоев: ABABABA или BABABAB. Полученные энергии образования были ниже для пластин с поверхностью, оканчивающейся слоем B.

Для сравнения энергии интерфейса с энергией поверхности кремния была рассчитана структура чистой поверхности Si (001). Для этого использовалась пластина, вырезанная из суперячейки кремния, содержащей 1×2×2 элементарных ячеек (7 атомных слоев). С целью исключить влияние на электронные свойства области интерфейса нескомпенсированных оборванных связей кремния с противоположной поверхности кремниевой пластины, эти оборванные связи были терминированы атомами водорода. Внешняя поверхность пленки силицида, не контактирующая с пластиной кремния, оканчивалась слоем B в соответствии с полученным выше результатом.

Далее были смоделированы возможные структуры интерфейса поверхности кремния (001) с поверхностью (100) найденной фазы дисилицида марганца. Для того, чтобы определить наиболее оптимальную по энергии структуру интерфейса между пленкой силицида и кремниевой подложкой, были рассмотрены различные варианты, во-первых, типа слоя силицида (*A* или *B*), непосредственно прилегающего к подложке, и, во-вторых, смещения фаз друг относительно друга. Для каждого варианта совмещения проводилась полная геометрическая оптимизацией всех атомов. В случае наложения слоем *A* пленка силицида состояла из 6 атомных слоев (BABABA от поверхности вглубь), в случае слоя *B* – из 7 атомных слоев (BABABAB). Энергия интерфейса E_{inteface} рассчитывалась по формуле

$$E_{\text{inteface}} = E(\text{Mn}_4\text{Si}_8 / \text{sub}) - \\ - n_{f.u} \cdot E(\text{Mn}_4\text{Si}_8) - E_{\text{sub}} - y \cdot E(\text{Si}) \qquad (2)$$

где $E(\text{Mn}_4\text{Si}_8 / \text{sub})$ – энергия всей системы пленки силицида на кремниевой подложке; $E(\text{Mn}_4\text{Si}_8)$ – полная энергия формульной единицы силицида; $n_{f.u}$ – число формульных единиц Mn_4Si_8 в системе; E_{sub} – полная энергия подложки; y – число атомов кремния в дополнительном слое *B*; $E(\text{Si})$ – энергия связи в кристалле кремния. В табл. 2 представлены значения, рассчитанные для различных вариантов совмещения (рис. 3).

В случае, когда Mn_4Si_8 накладывается на подложку слоем *A*, который содержит только атомы марганца, наиболее выгодным является совмещение, при котором атомы Si подложки, имеющие по две оборванные связи, располагаются по обе стороны от цепочки атомов Mn силицида (вариант № 3 на рис. 3). При этом направление связи Si–Mn совпадает с направлением оборванных связей как атома кремния из подложки, так и атома марганца. В этом случае энергия связи на 2,5–4,1 эВ/ячейку ниже, чем для остальных рассмотренных вариантов.

В случае укладки Mn_4Si_8 на подложку слоем *B*, который содержит только атомы кремния, все варианты относительного расположения оказываются более близкими по энергии. Наиболее выгодными являются совмещения, при котором атомы Si подложки располагаются под центрами квадратов или под центрами связей Si–Si, направленными вдоль оси *Y* (варианты № 1 и № 4 на рис. 3 соответственно). При такой структуре интерфейса энергия связи на 0,36 эВ/ячейку выше, чем в случае, когда Mn_4Si_8 совмещается с подложкой слоем *A* (с расположением по варианту № 1). Также стоит отметить, что расположение атома Si подложки под атомом Si силицида (вариант № 3) является наименее выгодным для совмещения по слою *B*.

Электронные и магнитные свойства в области интерфейса Mn_4Si_8/Si (001). Таким образом, наименьшей энергией обладает интерфейс с совмещением варианта № 4 с контактным слоем *B*. Для данной структуры интерфейса были исследованы электронные и магнитные свойства с помощью спин-поляризованных расчетов с проектированием электронных состояний на атомы. Спин-разрешенные парциальные плотности состояний (pDOS) для каждого атомарного слоя представлены на рис. 4.

Из распределения плотностей состояний следует, что в слоях, непосредственно прилегающих к интерфейсу, кремний приобретает проводящие свойства, при этом наибольший вклад в районе уровня Ферми вносит слой силицида, расположенный непосредственно за примыкающим к кремнию слоем. Для того, чтобы более подробно проследить изменение электронных свойств в зависимости от толщины слоя силицида, был выполнен спин-поляризованный расчет для структуры, содержащей дополнительный слой силицида (т. е. два дополнительных атомных слоя *A* и *B*). Результаты, полученные для такой структуры, представлены на рис. 5.

Кроме того, были рассчитаны свойства интерфейса с пятислойным силицидом марганца и произведено сравнение его магнитных свойств с 3- и 4-слойным силицидом.

Было показано, что независимо от количества слоев силицида магнитный момент на атомах марганца, непосредственно прилегающих к кристаллическому кремнию, составляет значение ниже, чем 0,71 μ_B, т. е. ниже, чем в объемном случае (табл. 3).

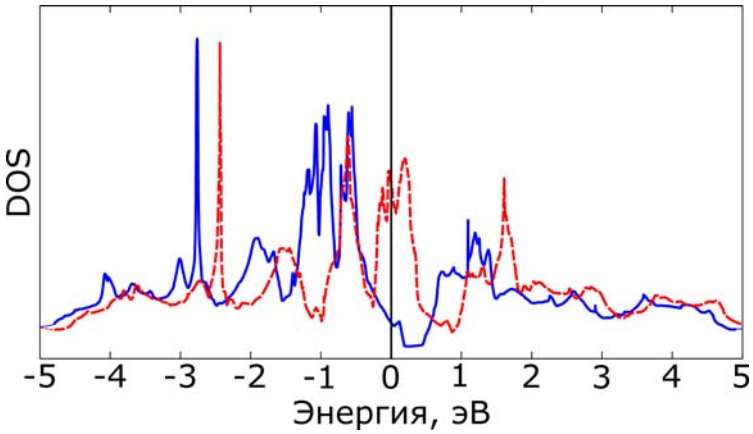


Рис. 2. Плотность состояний (DOS) P4/mmm-фазы Mn_4Si_8: сплошной линией показана DOS со спином вверх, пунктирной – DOS со спином вниз; уровень Ферми соответствует 0 эВ

Fig. 2. State density (DOS) P4/mmm of phase Mn_4Si_8: solid line shows DOS with the spin up, a dotted line shows DOS with the spin down. Fermi edge is 0 eV

Таблица 2

Энергии границы раздела фаз $E_{inteface}$ при различных вариантах строения интерфейса, эВ/ячейку

Относительное расположение	Слой *A*	Слой *B*
№ 1	6,33	1,87
№ 2	5,55	2,02
№ 3	2,20	2,38
№ 4	4,71	1,83

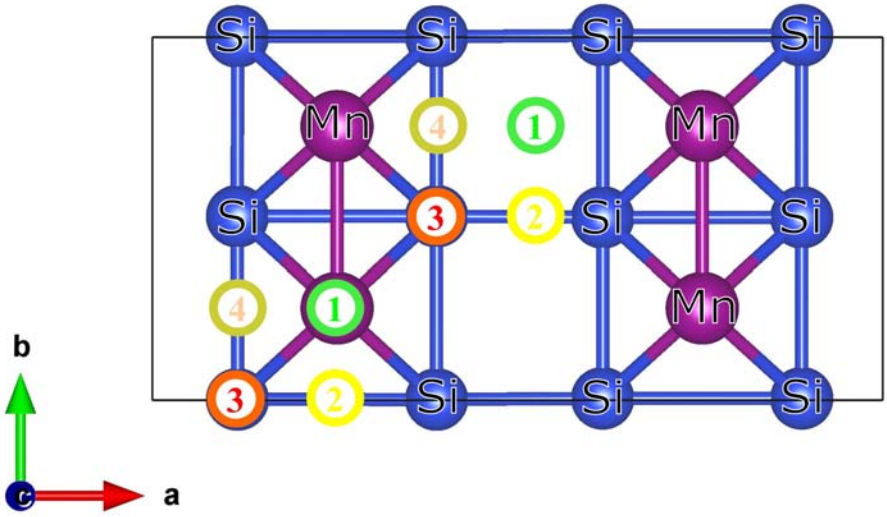


Рис. 3. Позиции, которые занимают верхние атомы Si подложки при различных вариантах расположения подложки относительно силицида Mn_4Si_8: атомы Mn принадлежат слою *A*, атомы Si – слою *B*

Fig. 3. Positions which upper atoms of Si foundation hold in specific configuration of foundation with respect to silicide Mn_4Si_8. Atoms Mn belongs to the layer *A*, atoms Si belongs to the layer *B*

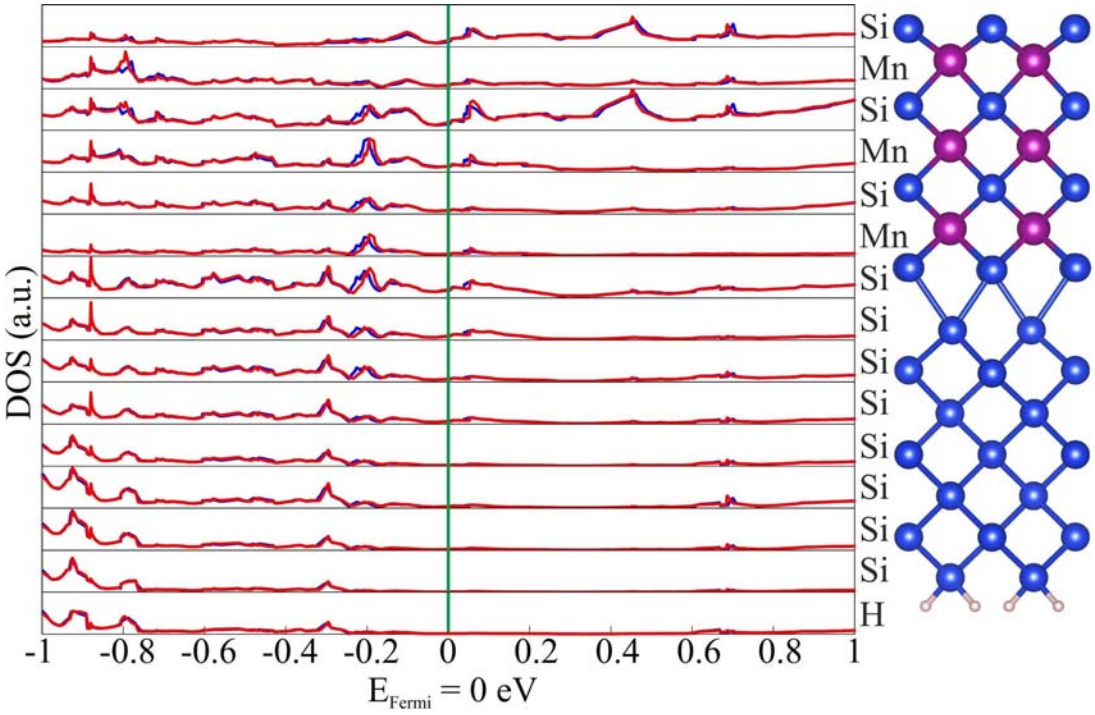


Рис. 4. Плотности состояний (DOS) и структура области интерфейса Mn_4Si_8/(001)Si с 3 слоями силицида

Fig. 4. State density (DOS) and structure of interface area Mn_4Si_8/(001)Si with 3 layers of silicide

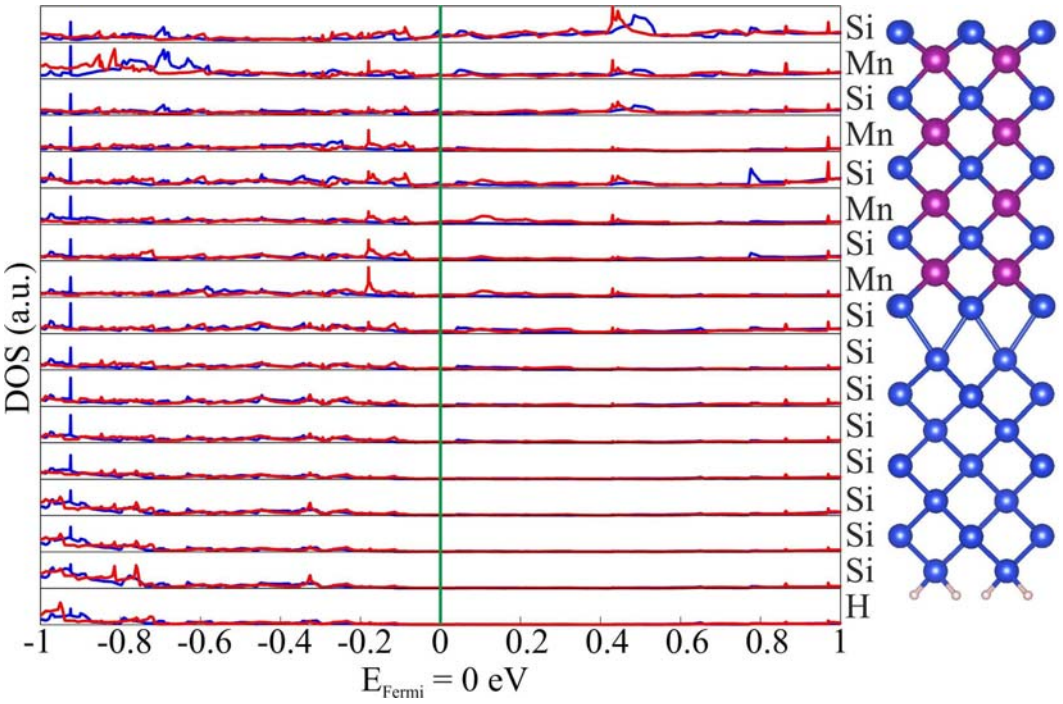


Рис. 5. Плотности состояний (DOS) и структура области интерфейса Mn_4Si_8/(001)Si с 4 слоями силицида

Fig. 5. State density (DOS) and structure of interface area Mn_4Si_8/(001)Si with 4 layers of silicide

Таблица 3

Магнитный момент на атомах Mn в структуре Mn_4Si_8/(001)Si в зависимости от количества слоёв силицида

Количество слоёв Mn_4Si_8	Среднее значение магнитного момента на атом Mn, μ_B	Значение магнитного момента на атом Mn (μ_B) в зависимости от номера слоя от области интерфейса				
		1	2	3	4	5
5	0,33	0,36	0,80	0,63	0,07	–0,14
4	0,25	0,39	0,80	0,03	–0,20	–
3	0,03	0,23	0,00	–0,30	–	–

Магнитный момент атомов марганца вблизи чистой поверхности плёнки силицида имеет противоположный знак, однако с увеличением толщины плёнки его абсолютная величина стремится к нулю. Самое большое значение магнитного момента (0,8 μ_B) наблюдается на атомах второго слоя силицида при условии, что толщина плёнки составляет не менее 4-х слоев силицида. Также можно заключить, что наличие интерфейса сказывается только на ближайший к нему слой силицида, в то время как влияние чистой поверхности распространяется минимум на 2 слоя вглубь.

Заключение. Был произведён поиск фаз силицидов марганца, образование которых вероятно при эпитаксиальном росте на поверхности кремния Si (001). Все обнаруженные фазы являются проводящими и проявляют склонность к антиферромагнитному упорядочению магнитных моментов, за исключением немагнитной $P4_2$/mnm-фазы марганца и ферромагнитной фазы Mn_4Si_8 с высокой спиновой поляризацией. Изучены структуры интерфейсов, образованных поверхностью кремния (001) и найденным силицидом Mn_4Si_8. Определена наиболее энергетически выгодная атомная структура, а также электронные и магнитные свойства интерфейсов. При уменьшении толщины пленки Mn_4Si_8 до 3-х элементарных ячеек наблюдается подавление магнитного упорядочения и исчезновение спиновой поляризации. Также обнаружено, что влияние чистой поверхности распространяется минимум на 2 слоя вглубь, что можно соотнести с вкладом от оборванных связей. При этом наличие интерфейса сказывается только на ближайший к нему слой силицида, что позволяет говорить о сохранении магнитных свойств плёнок найденного силицида при их малой толщине вплоть до нескольких нанометров. Благодаря высокому значению отрицательной спиновой поляризации (–66 %) тонкие плёнки найденной фазы силицида марганца могут стать перспективным материалом для спинтронных устройств.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Информационно-вычислительному центру Новосибирского государственного университета и Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН за предоставленный доступ к вычислительным ресурсам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00252 мол_а и 17-42-190308 р_а и программы поддержки ведущих научных школ России (НШ-7559.2016.2).

Acknowledgments. The authors would like to thank the Information Technology Centre of Novosibirsk State University and Joint Supercomputer Center of RAS for providing access to cluster computational resources. This work was supported by the RFBR, through the research project No. 16-32-00252 mol_a and 17-42-190308 r_a, and by the leading Russian scientific school support programme (NSh-7559.2016.2).

Библиографические ссылки

1. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 12. С. 1336–1348.

2. Грюнберг П. А. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 12. С. 1349–1358.

3. Semiconducting silicide-silicon heterostructures: growth, properties and applications / J. Derrien [et al.] // Applied surface science. 1992. Vol. 56. P. 382–393.

4. “Nanoparticle-in-Alloy” approach to efficient thermoelectrics: silicides in SiGe / N. Mingo [et al.] // Nano letters. 2009. Vol. 9, No. 2. P. 711–715.

5. Senthilarasu S., Sathyamoorthy R., Lalitha S. Synthesis and characterization of β-$FeSi_2$ grown by thermal annealing of Fe/Si bilayers for photovoltaic applications // Solar energy materials and solar cells. 2004. Vol. 82, No. 1. P. 299–305.

6. Brief observe on iron silicide growth on amorphous silicon / A. S. Gouralnik [et al.] // Physica status solidi (c). 2013. Vol. 10, No. 12. P. 1742–1745.

7. Eschrig M. Spin-polarized supercurrents for spintronics: a review of current progress // Reports on Progress in Physics. 2015. Vol. 78, No. 10. P. 104501.

8. Моргунов Р. Б., Дмитриев А. И. Спиновая динамика в наноструктурах магнитных полупроводников (обзор) // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, № 10. С. 1873–1889.

9. Odkhuu D., Yun W. S., Hong S. C. Magnetocrystalline anisotropy energy and spin polarization of Fe_3Si in bulk and on Si (001) and Si (111) substrates // Thin Solid Films. 2011. Vol. 519, No. 23. P. 8218–8222.

10. Naito M., Ishimaru M. Early stage of the crystallization in amorphous Fe–Si layers: formation and growth of metastable α-$FeSi_2$ // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2009. Vol. 267, No. 8. P. 1290–1293.

11. Structural asymmetry of Si/Fe and Fe/Si interface in Fe/Si multilayers / S. R. Naik [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. Vol. 41, No. 11. P. 115307.

12. Magnetic properties and nonmagnetic phases formation in $(Fe/Si)_n$ films / S. N. Varnakov [et al.] // Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 104, No. 9. P. 094703.

13. Above room temperature ferromagnetism in Mn-ion implanted Si / M. Bolduc, [et al.] // Physical Review B. 2005. Vol. 71, No. 3. P. 033302.

14. Структура, электрические и магнитные свойства и природа ферромагнетизма при комнатной температуре в кремнии, имплантированном марганцем / А. Ф. Орлов [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 136, № 4. С. 703–710.

15. Hortamani M., Kratzer P., Scheffler M. Density-functional study of Mn monosilicide on the Si (111) surface: Film formation versus island nucleation // Physical Review B. 2007. Vol. 76, No. 23. P. 235426.

16. Formation of higher manganese silicide films on silicon / T. S. Kamilov [et al.] // Technical physics. 2005. Vol. 50, No. 8. P. 1102–1104.

17. Geisler B., Kratzer P. Strain stabilization and thickness dependence of magnetism in epitaxial transition metal monosilicide thin films on Si (111) // Physical Review B. 2013. Vol. 88, No. 11. P. 115433.

18. Formation and characterization of manganese silicide on Si (111) and Si (100) substrates / K. H. Kim [et al.] // Journal of the Korean Physical Society. 2007.Vol. 51, No. 3. P. 1032.

19. Initial growth stages of manganese films on the Si (100) 2×1 surface / S. N. Varnakov [et al.] // Physics of the Solid State. 2014.Vol. 56, No. 2. P. 380–384.

20. Interface structure and stabilization of metastable B2-FeSi/Si (111) studied with low-energy electron diffraction and density functional theory / S. Walter [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. 2003. Vol. 15, No. 30. P. 5207.

21. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals // Physical Review B. 1993. Vol. 47, No. 1. P. 558.

22. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal–amorphous-semiconductor transition in germanium // Physical Review B. 1994. Vol. 49, No. 20. P. 14251.

23. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Physical review B. 1996. Vol. 54, No. 16. P. 11169.

24. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Physical review. 1964. Vol. 136, No. 3B. P. B864.

25. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Physical review. 1965. Vol. 140, No. 4A. P. A1133.

26. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method // Physical review B. 1994. Vol. 50, No. 24. P. 17953.

27. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // Physical Review B. 1999. Vol. 59, No. 3. P. 1758.

28. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // Physical review letters. 1996. Vol. 77, No. 18. P. 3865.

29. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations // Physical review B. 1976. Vol. 13, No. 12. P. 5188.

30. Oganov A. R., Glass C. W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications // The Journal of chemical physics. 2006. Vol. 124, No. 24. P. 244704.

31. Oganov A. R., Lyakhov A. O., Valle M. How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works and Why // Accounts of chemical research. 2011. Vol. 44, No. 3. P. 227–237.

32. New developments in evolutionary structure prediction algorithm USPEX / A. O. Lyakhov [et al.] // Computer Physics Communications. 2013. Vol. 184, No. 4. P. 1172–1182.

33. Faken D., Jónsson H. Systematic analysis of local atomic structure combined with 3D computer graphics // Computational Materials Science. 1994. Vol. 2, No. 2. P. 279–286.

34. Magnetism in bcc and fcc manganese / G. Fuster [et al.] // Physical Review B. 1988. Vol. 38, No. 1. P. 423.

References

1. Fert A. [The origin, development and future of spintronics]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2008, Vol. 178, No. 12, P. 1336–1348 (In Russ.).

2. Grünberg P. A. [From spinwaves to giant magnetoresistance and beyond]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2008, Vol. 51, No. 12, P. 1349–1358 (In Russ.).

3. Derrien J., Chevrier J., Le Thanh V., Mahan J. E. Semiconducting silicide-silicon heterostructures: growth, properties and applications. *Applied surface science*. 1992, Vol. 56, P. 382–393.

4. Mingo N., Hauser D., Kobayashi N. P., Plissonnier M., Shakouri A. "Nanoparticle-in-Alloy" approach to efficient thermoelectrics: silicides in SiGe. *Nano letters*. 2009, Vol. 9, No. 2, P. 711–715.

5. Senthilarasu S., Sathyamoorthy R., Lalitha S. Synthesis and characterization of β-$FeSi_2$ grown by thermal annealing of Fe/Si bilayers for photovoltaic applications. *Solar energy materials and solar cells*. 2004, Vol. 82, No. 1, P. 299–305.

6. Gouralnik A. S., Lin K. W., Dotsenko S. A., Galkin N. G., Plotnikov V. S., Pustovalov E. V., Cherednichenko A. I., Vavanova S. V., Shevlyagin A. V., Gutakovski A. K., Neklyudova, M. A. Brief observe on iron silicide growth on amorphous silicon. *Physica status solidi (c)*. 2013, Vol. 10, No. 12, P. 1742–1745.

7. Eschrig M. Spin-polarized supercurrents for spintronics: a review of current progress *Reports on Progress in Physics*. 2015, Vol. 78, No. 10, P. 104501.

8. Morgunov R. B. Dmitriev A. I. [Spin dynamics in magnetic semiconductor nanostructures]. *Fizika tverdogo tela*. 2009, Vol. 51, No. 10, P. 1985–2002 (In Russ.).

9. Odkhuu D., Yun W. S., Hong S. C. Magnetocrystalline anisotropy energy and spin polarization of Fe_3Si in bulk and on Si (001) and Si (111) substrates. *Thin Solid Films*. 2011, Vol. 519, No. 23, P. 8218–8222.

10. Naito M., Ishimaru M. Early stage of the crystallization in amorphous Fe–Si layers: formation and growth of metastable α-$FeSi_2$. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2009, Vol. 267, No. 8, P. 1290–1293.

11. Naik S. R., Rai S., Tiwari M. K., Lodha G. S. Structural asymmetry of Si/Fe and Fe/Si interface in Fe/Si multilayers. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008, Vol. 41, No. 11, P. 115307.

12. Varnakov S. N., Komogortsev S. V., Ovchinnikov S. G., Bartolome J., Sese J. Magnetic properties and nonmagnetic phases formation in $(Fe/Si)_n$ films. *Journal of Applied Physics*. 2008, Vol. 104, No. 9, P. 094703.

13. Bolduc M., Awo-Affouda C., Stollenwerk A., Huang M. B., Ramos F. G., Agnello G., LaBella V. P. Above room temperature ferromagnetism in Mn-ion implanted Si *Physical Review B*, 2005, Vol. 71, No. 3, P. 033302.

14. Orlov A. F., Granovsky A. B., Balagurov L. A., Kulemanov I. V., Parkhomenko Y. N., Perov N. S., Gan'shina E. A., Bublik V. T., Shcherbachev K. D., Kartavykh A. V., Vdovin V. I., Sapelkin A., Saraikin V. V., Agafonov Yu. A., Zinenko V. I., Rogalev A., Smekhova A. Structure, electrical and magnetic properties, and the origin of the room temperature ferromagnetism in Mn-implanted Si. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2009, Vol. 109, No. 4, P. 602–608.

15. Hortamani M., Kratzer P., Scheffler M. Density-functional study of Mn monosilicide on the Si (111) surface: Film formation versus island nucleation. *Physical Review B*. 2007, Vol. 76, No. 23, P. 235426.

16. Kamilov T. S., Kabilov D. K., Samiev I. S., Khusnutdinova K. K., Muminov R. A., Klechkovskaya V. V. Formation of higher manganese silicide films on silicon. *Technical physics*. 2005, Vol. 50, No. 8, P. 1102–1104.

17. Geisler B., Kratzer P. Strain stabilization and thickness dependence of magnetism in epitaxial transition metal monosilicide thin films on Si (111). *Physical Review B*. 2013, Vol. 88, No. 11, P. 115433.

18. Kim K. H., Lee J. D., Lee J. J., Han S. W., Kang J. Formation and characterization of manganese silicide on Si(111) and Si(100) substrates. *Journal of the Korean Physical Society*. 2007, Vol. 51, No. 3, P. 1032.

19. Varnakov S. N., Gomoyunova M. V., Grebenyuk G. S., Zabluda V. N., Ovchinnikov S. G., Pronin I. I. Initial growth stages of manganese films on the Si (100) 2×1 surface. *Physics of the Solid State*. 2014, Vol. 56, No. 2, P. 380–384.

20. Walter S., Blobner F., Krause M., Müller S., Heinz K., Starke U. Interface structure and stabilization of metastable B2-FeSi/Si (111) studied with low-energy electron diffraction and density functional theory. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003, Vol. 15, No. 30, P. 5207.

21. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Physical Review B*. 1993, Vol. 47, No. 1, P. 558.

22. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal–amorphous-semiconductor transition in germanium. *Physical Review B*. 1994, Vol. 49, No. 20, P. 14251.

23. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Physical review B*. 1996, Vol. 54, No. 16, P. 11169.

24. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Physical review*. 1964, Vol. 136, No. 3B, P. B864.

25. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical review*. 1965, Vol. 140, No. 4A, P. A1133.

26. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method. *Physical review B*. 1994, Vol. 50, No. 24, P. 17953.

27. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Physical Review B*. 1999, Vol. 59, No. 3, P. 1758.

28. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. *Physical review letters*. 1996, Vol. 77, No. 18, P. 3865.

29. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Physical review B*. 1976, Vol. 13, No. 12, P. 5188.

30. Oganov A. R., Glass C. W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques: Principles and applications. *The Journal of chemical physics*. 2006, Vol. 124, No. 24, P. 244704.

31. Oganov A. R., Lyakhov A. O., Valle M. How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works and Why. *Accounts of chemical research*. 2011, Vol. 44, No. 3, P. 227–237.

32. Lyakhov A. O., Oganov A. R., Stokes H. T., Zhu Q. New developments in evolutionary structure prediction algorithm USPEX. *Computer Physics Communications*. 2013, Vol. 184, No. 4, P. 1172–1182.

33. Faken D., Jónsson H. Systematic analysis of local atomic structure combined with 3D computer graphics. *Computational Materials Science*. 1994, Vol. 2, No. 2, P. 279–286.

34. Fuster G., Brener N. E., Callaway J., Fry J. L., Zhao Y. Z., Papaconstantopoulos D. A. Magnetism in bcc and fcc manganese. *Physical Review B*. 1988, Vol. 38, No. 1, P. 423.

© Лубкова Т. А., Бычек А. А., Попов З. И., Чепкасов И. В., Высотин М. А., 2017

УДК 544.623.032.52

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 949–955

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РЫБНЫХ ОТХОДОВ В РЕАКТОРЕ «МОКРОГО» СЖИГАНИЯ ДЛЯ ЗАМКНУТЫХ ЭКОСИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С. В. Трифонов[1, 2*], Е. А. Морозов[1, 2], А. В. Мурыгин[2], А. А. Тихомиров[1, 2]

[1]Институт биофизики СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50
[2]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

Технологии утилизации органических отходов внутри замкнутых экосистем (ЗЭС) космического назначения позволяют вовлекать вещество отходов в массообменный процесс ЗЭС, что обеспечивает поддержание жизнедеятельности экипажа. Среди таких технологий перспективной представляется комплексная технология, включающая утилизацию и вовлечение во внутрисистемный массообмен рыбных отходов. Это связано с тем, что рыба рассматривается как один из перспективных источников животного белка для экипажа ЗЭС. В связи с этим представлены результаты исследований по разработке технологии минерализации органических отходов, включая рыбные отходы. Требования, предъявляемые к такой технологии, включают, в частности, экологичность образующихся продуктов, приемлемую скорость переработки (среднее время переработки суточной нормы отходов не превышает суток), достаточную легкость и компактность, простоту включения продуктов в трофическую цепь биологических звеньев ЗЭС и возможность совместно перерабатывать различные типы органических отходов, характерных для ЗЭС (плотные и жидкие отходы жизнедеятельности человека, несъедобная растительная биомасса и продукты жизнедеятельности и несъедобная биомасса других биологических звеньев ЗЭС). Разработанный в Институте биофизики СО РАН метод «мокрого» сжигания в перекиси водорода удовлетворяет вышеперечисленным требованиям и был взят за основу технологического процесса утилизации рыбных отходов. В ходе исследования была экспериментально доказана эффективность совместного окисления рыбных отходов с экзометаболитами человека, что в совокупности с процессом пережигания осадка в реакторе «мокрого» сжигания позволяет минерализовать рыбные отходы в достаточной мере, чтобы использовать продукты переработки в качестве источника минерального питания растительного звена ЗЭС. Общее время технологических процессов составляет примерно 14 ч. Удается вывести в доступную для растений форму более 90 % минеральных макроэлементов. Полученная динамика процесса позволяет в дальнейшем наладить автоматическое управление реактором на основании показаний текущего времени с возможностью аварийного отключения по показаниям давления, температуры и силы тока. Представленная работа открывает перспективы для разработки блока физико-химической комплексной переработки различных видов органических отходов для ЗЭС космического назначения.

Ключевые слова: замкнутые системы жизнеобеспечения, массообмен, технологические процессы, переработка отходов, удобрения.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 949–955

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY FOR MINERALIZATION OF FISH WASTE IN THE “WET” COMBUSTION REACTOR FOR THE CES INTENDED FOR SPACE FLIGHTS

S. V. Trifonov[1, 2*], E. A. Morozov[1, 2], A. V. Murygin[2], A. A. Tikhomirov [1, 2]

[1]Institute of Biophysics SB RAS
50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

By using technologies of organic waste processing within Closed Ecological Systems (CES) intended for space flights, waste material can be involved in the CES material cycling, enabling life support of the crew. An integrated technology, which includes fish waste processing and involvement in the mass exchange in the system, seems a promising process. Fish is considered as one of the potential sources of animal protein for the CES crew. Thus, this paper reports the results of developing the technology for mineralization of organic waste, including fish waste. Such a technology must meet the following requirements: the resultant products must be environmentally friendly, processing must

take a reasonable period of time (the average time of processing of the daily waste is no longer than 24 h), the processing facility must be easy to handle and compact, the products must be readily incorporated into the food chain of the CES biological components, and the technology must be suitable for simultaneous processing of various types of organic waste typical of the CES (human solid and liquid wastes, inedible plant biomass, and waste products and inedible biomass of other biological components of the CES). The method of "wet" combustion in hydrogen peroxide developed at the Institute of Biophysics SB RAS fulfills the above requirements, and, thus, it was used as the basis for the fish waste processing technology. The process of oxidation of fish waste together with human solid and liquid waste developed in this study enables both burning the sediment in the "wet" combustion reactor and mineralizing fish waste to products that can be used as a source of mineral nutrients for the plant component of the CES. The total duration of the technological processes is about 14 h. More than 90 % of mineral macro elements are present in the resultant products in the form available to plants. The process dynamics achieved in this study suggests that, in the future, the reactor can be controlled automatically, based on the running time data, with the emergency shutdown based on indicators of pressure, temperature, and current intensity. The present study offers the opportunity to develop a compartment of physicochemical processing of various organic waste types for the CES intended for space flights.

Keywords: closed life support systems, mass exchange, technological processes, waste processing, fertilizers.

Введение. Применение замкнутых систем жизнеобеспечения (ЗСЖО) для продолжительных миссий человека на Луне, Марсе и других небесных телах требует организации круговоротных массообменных процессов. Такие процессы являются ключевым моментом, так как позволяют вновь получать из отходов жизнедеятельности экипажа и других органических отходов, характерных для ЗСЖО, жизненно важные для человека продукты: кислород, воду и пищу. Благодаря этому снижается необходимость в поставках продуктов на инопланетные базы, что значительно удешевляет их эксплуатацию и повышает их автономность. При этом для организации такого круговорота требуются технологии и оборудование, имеющие существенный вес и размеры. Поэтому вопрос создания габаритного и простого в реализации метода утилизации органических отходов, предназначенного для их переработки в минеральные удобрения, является актуальным.

В Институте биофизики СО РАН разработан метод «мокрого» сжигания отходов в водном растворе перекиси водорода под действием переменного электрического тока. Данный метод позволяет перерабатывать различные типы отходов (экзометаболиты человека, несъедобная растительная биомасса) в течение нескольких часов при температуре и давлении, близких к нормальным [1; 2]. Получаемый таким образом минерализованный раствор может быть использован в качестве добавки минерального питания звена высших растений [3]. Способ позволяет осуществить минерализацию различных типов отходов при соответствующем подборе напряжения, подаваемого на электроды реактора, обеспечивающего приемлемую глубину минерализации (вывод большей части минеральных элементов в раствор) в течение нескольких часов и полное разложение остаточных количеств перекиси водорода в растворе. Такой соответствующий подбор напряжения далее по тексту будет обозначаться как режим минерализации.

Ранее были успешно разработаны режимы, позволяющие утилизировать в реакторе «мокрого» сжигания экзометаболиты человека и несъедобную растительную биомассу [2], источниками которых в ЗСЖО являются звено-задатчик – экипаж и источник растительной пищи – звено высших растений [4; 5]. В то же время, если мы говорим о внеземных планетарных космических базах, функционирующих автономно многие годы, необходимо решить вопрос обеспечения экипажа животной пищей. Одним из наиболее перспективных кандидатов рассматривается рыба, так как к рыбной пище нет психологического барьера и она является универсальной практически для всего населения планеты. Однако употребление рыбы в диете экипажа ведет к образованию внутри системы нового типа органических отходов – рыбных отходов (чешуя, голова и внутренности). В связи с этим целью данной работы является разработка режима и принципов минерализации рыбных отходов методом «мокрого» сжигания.

Материалы и методы. Метод «мокрого» сжигания подробно описан в работах [1; 6]. Способ реализации – емкость реактора из химически стойкого материала с двумя электродами и обратным холодильником для снижения интенсивности испарения также опубликован, он достаточно прост и не требует значительной массы материала и вспомогательного оборудования [3; 7]. Конструкция реактора позволяет осуществлять минерализацию любых типов органических отходов после предварительного измельчения и смешивания с перекисью водорода (33–36 %) путем подбора соответствующего режима минерализации, управляемого напряжением, подаваемым на электроды.

В данной статье в качестве потенциального источника белка для экипажа была выбрана речная рыба карась как один из представителей костистых пресноводных рыб, отличающийся неприхотливостью к среде обитания и всеядностью [8]. Речная рыба была рассмотрена в связи с тем, что для морской необходимо выдерживать определенный состав солей, тогда как пресная вода может быть легко получена конденсацией внутри системы, при этом она уже будет витализирована, так как конденсат получается от транспирационной растительной влаги.

В состав рыбных отходов были включены чешуя, внутренности и головы рыб. Кости и плавники были отнесены к съедобной биомассе, так как способ приготовления рыбы в мультиварке позволяет в достаточной мере обработать эти элементы, чтобы включить их в рацион экипажа вместе с мясом рыбы. Кроме того эти элементы послужат источником кальция

для экипажа, что необходимо в условиях пониженной гравитации Марса и Луны. Всю несъедобную биомассу высушивали при 70 °С, измельчали и смешивали с водным раствором перекиси водорода (33 %) в соотношении 4 мл H_2O_2 (33 %) на 1 г сухих отходов. Данное соотношение было выбрано как начальное для пробных опытов по минерализации рыбных отходов и основывалось на норме расхода перекиси водорода при утилизации 1 г нативного кала [1].

Было выбрано два подхода в разработке режима минерализации рыбных отходов:

1) минерализация только рыбных отходов;

2) совместная минерализация экзометаболитов человека и рыбных отходов.

Совместная минерализация была выбрана исходя из соображений, что в рыбных отходах содержится большое количество высоковосстановленной органики, в том числе полиненасыщенных жирных кислот, которая может трудно поддаваться окислению или же вообще оказывать стабилизирующее действие на перекись водорода. В результате это могло привести к значительному увеличению времени минерализации и существенному снижению степени окисления из-за разложения перекиси водорода под действием переменного тока без взаимодействия с органическим материалом. Экзометаболиты человека, отличающиеся простотой окисления методом «мокрого» сжигания (время процесса – 1,5–3 ч) [1; 6], играют здесь роль активатора окисления тяжелой органики.

Вовлечение экзометаболитов требует выработки нормы соотношения перерабатываемой массы отходов жизнедеятельности человека и рыбных отходов. Суточная потребность человека в белке составляет примерно 50 г/сут, содержание белка в 100 г рыбы – около 16 г. Таким образом, исходя из данных о потребностях человека в белке, суточную норму рыбных отходов рассчитывали как массу отходов, приходящуюся на 312,5 г мяса речного карася. В сухом виде эта масса отходов составляет примерно 50 ± 2 г. Суточная норма экзометаболитов человека – 150 г нативного кала и 1,5 л урины.

Минерализацию рыбных отходов осуществляли в реакторе с рабочим объемом 1,25 л. Было выработано два режима процесса, управление которыми происходило за счет изменения величины напряжения тока, подаваемого на электроды реактора. В первом случае (ускоренный режим) стремились осуществить наиболее быстрый процесс окисления, многократно меняя значение напряжения так, чтобы процесс протекал максимально интенсивно: повышали напряжение, чтобы усилить интенсивность газовыделения и пенообразования, и снижали напряжение, если процесс минерализации чрезмерно разгонялся и возникала угроза прорыва реактора. Во втором случае (стандартный режим) был выбран режим стабильного течения реакции за приемлемое время (порядка 10 ч), при котором применили технику трехступенчатого течения процесса, как и при минерализации экзометаболитов [1]: стадия разгона реакции за счет повышенного напряжения, стадия поддержания стабильного течения реакции за счет более низкого значения напряжения и стадия дожига, при которой с помощью повышенного напряжения осуществляли разложение остаточных количеств перекиси водорода в растворе.

После минерализации отходов полученные раствор и осадок разделяли и проводили повторную минерализацию осадка в смеси перекиси водорода (36 %) и азотной кислоты (65 %) в реакторе «мокрого» сжигания по методике, описанной в [9]. Расход перекиси (36 %) и кислоты (65 %) составил 8,24 и 4,18 мл соответственно. Повторная минерализация необходима для того, чтобы вывести из осадка в растворимую форму дополнительную массу таких элементов, как Ca, Mg, P и S, необходимых для питания звена высших растений. Вопросы синтеза перекиси водорода и азотной кислоты внутри ЗСЖО освещены в [10–12].

Эффективность работы режимов минерализации оценивали по таким параметрам, как время процесса, энергопотребление, глубина окисления раствора и осадка (оценивали по значению химического поглощения кислорода (ХПК)) и доля элементов, выходившая в растворенную форму. Эффективность повторного пережигания осадка оценивали по доле элементов, выходивших в растворенной форме из осадка в вытяжку.

Результаты и обсуждение. При минерализации только рыбных отходов не удалось довести процесс до конца, так как в растворе после 13 ч реакции оставалось значительной количество перекиси водорода – порядка нескольких процентов. Поэтому данный подход был признан неэффективным для утилизации рыбных отходов.

Динамика процесса совместной минерализации рыбных отходов и экзометаболитов человека отображена на рис. 1 и 2. При ускоренном режиме минерализации отходов было использовано 4 значения напряжения тока (рис. 1), из которых только два были задействованы большую часть времени – 70 и 100 В, эти значения далее были выбраны при работе со стандартным режимом. Основываясь на показаниях динамики силы тока (рис. 2), можно сделать вывод, что оба режима обеспечили примерно одинаковый выход минеральных элементов при минерализации. Это следует из того, что в конце процесса в обоих случаях объем минерализованного раствора отличался не более чем на 20 мл, при этом сила тока в конце каждого режима достигла одинаковых значений. Следовательно, большего выхода минеральных элементов можно достичь только повторным окислением осадка в смеси перекиси водорода и азотной кислоты.

Из данных табл. 1 видно, что при стандартном режиме минерализации отходов процесс занимает большее время и протекает с большим энергопотреблением, однако при данном режиме процесс протекает стабильно: пенообразование происходит не столь интенсивно и снижается риск прорыва реактора. Также следует обратить внимание на то, что при стандартном режиме образовалось примерно в три раза меньше осадка, при этом значение ХПК раствора увеличивается только на треть. Это связано с тем, что из-за более глубокой минерализации осадка часть недоокисленных органических соединений уходит в раствор в виде взвеси. Степень минерализации осадка при стандартном режиме вдвое выше, и получается,

что при данном режиме литр минерализованных отходов (осадок + раствор) минерализован в два раза глубже, чем при ускоренном: ~ 15,5 и ~7,2 г/л для ускоренного и стандартного режимов соответственно. Также видно, что при стандартном режиме содержание липидов в осадке в два раза ниже, чем при ускоренном. Все это свидетельствует о более глубокой минерализации органических отходов в случае использования стандартного режима. Поэтому данный режим был взят за основу для совместной утилизации рыбных отходов и экзометаболитов человека.

Рассматривая степень выхода минеральных элементов в раствор (табл. 2), видно, что такие элементы, как Ca, Fe, Mg и P, в основной массе (от 80 до 90 %) находятся в осадке. Поэтому при добавлении таких продуктов минерализации в питательный раствор для выращивания растений фототрофного звена ЗСЖО на нейтральном субстрате они окажутся в недоступной для растений форме. Данные элементы могут быть усвоены растениями при внесении осадка в почвоподобный субстрат [13–15], однако в этом случае время утилизации осадка в почвоподобном субстрате, а значит и время возвращения элементов в массообменный цикл ЗСЖО, может достигать нескольких месяцев [16]. Это может потребовать повторной минерализации осадка в реакторе «мокрого» сжигания в смеси перекиси водорода и кислоты.

Повторная минерализация привела к выходу в доступную для растений форму (в составе раствора и вытяжки из осадка) более 90 % минеральных макроэлементов и около 84 % железа (табл. 3). Время процесса и его удельное энергопотребление при этом составили 3,5 ч и 7,2 кВт·ч на 1 л минерализуемых отходов соответственно.

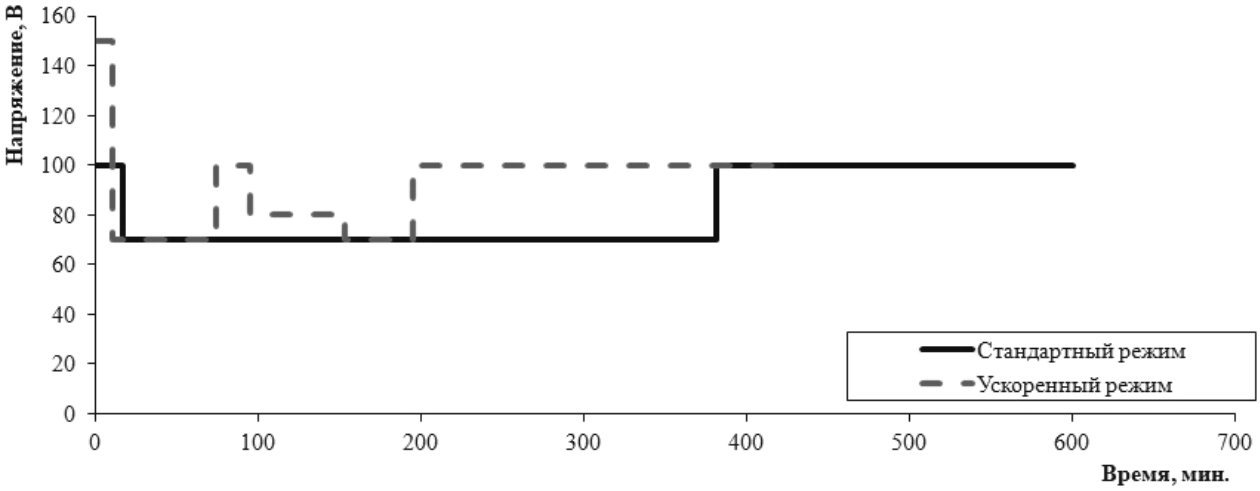


Рис. 1. Динамика изменения напряжения тока на электродах при различных режимах совместной минерализации рыбных отходов с экзометаболитами человека

Fig. 1. Dynamics of voltage change at electrodes under different regimes of joint mineralization of fish wastes with human exometabolites

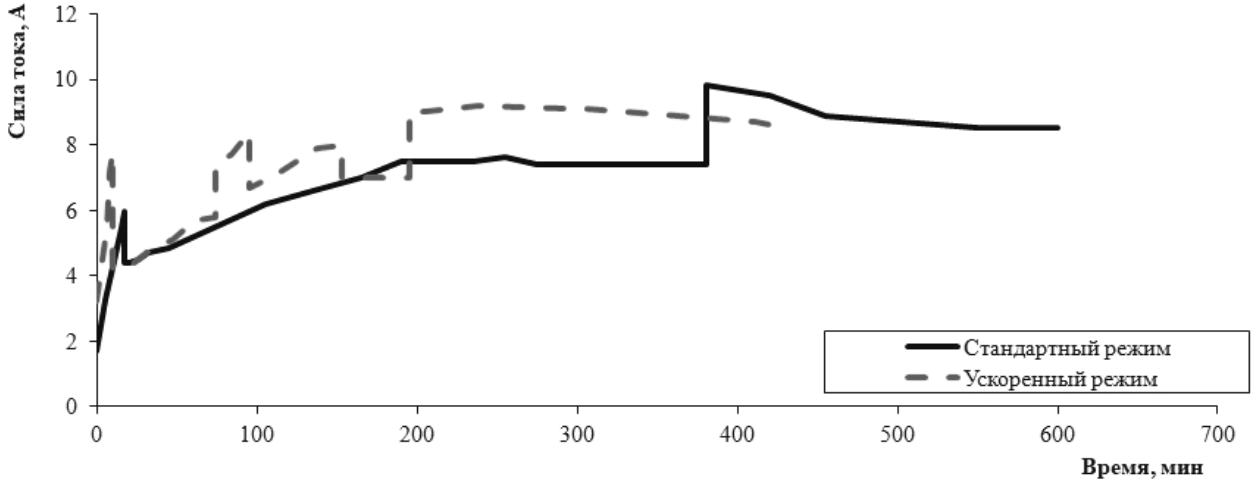


Рис. 2. Динамика изменения силы тока на электродах при различных режимах совместной минерализации рыбных отходов с экзометаболитами человека

Fig. 2. Dynamics of current intensity change at electrodes under different regimes of joint mineralization of fish wastes with human exometabolites

Таблица 1

Эффективность различных режимов совместной минерализации рыбных отходов с экзометаболитами

Режим	Конечные продукты	ХПК, мг/л	Осадок, мг/л	Время реакции, мин	Удельное энергопотребление, кВт·ч/л
Ускоренный	Раствор	3711,23	6234,40	429	4,16
	Осадок	11747,48			
Стандартный	Раствор	4985,42	2233,87	600	4,98
	Осадок	2166,41			

Таблица 2

Распределение минеральных макроэлементов и железа в продуктах совместной переработки рыбных отходов и экзометаболитов человека, %

Продукт минерализации	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S
Раствор	0,7	1,1	95,8	18,2	94,8	18,1	95,9
Осадок	99,3	98,9	4,2	81,8	5,2	81,9	4,1

Таблица 3

Распределение минеральных макроэлементов и железа в продуктах переработки после повторной минерализации осадка, %

Продукт минерализации	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S
Раствор	0,7	1,1	95,8	18,2	94,8	18,1	95,9
Вытяжка из осадка	94,4	83,0	4,0	78,6	5,0	78,5	3,9
Конечный осадок	4,9	15,9	0,2	3,2	0,2	3,4	0,2

Таким образом, можно сказать, что оптимальным методом утилизации рыбных отходов является их совместная минерализация с экзометаболитами человека в реакторе «мокрого» сжигания с последующим пережиганием осадка в смеси перекиси водорода и кислоты.

Заключение. В результате выполненной работы был выработан подход в утилизации рыбных отходов применительно к массообменным процессам ЗСЖО космического назначения. Установлено, что минерализация рыбных отходов в реакторе «мокрого» сжигания требует присутствия легкоокисляемой органики как активатора процесса окисления. В качестве такой органики в условиях ЗСЖО выступают экзометаболиты человека. Показано, что стандартный режим хода процесса минерализации, поддерживающий устойчивое окисление без критических моментов повышения газовыделения и пенообразования, приводит к более глубокому окислению отходов при сравнительно небольшом повышении удельного энергопотребления. Показана эффективность проведения повторной минерализации осадка в реакторе «мокрого» сжигания в смеси перекиси водорода и кислоты для более полного выведения минеральных элементов в доступную для растений форму.

В итоге, разработанная технология минерализации рыбных отходов имеет следующие характеристики: общее время процессов минерализации отходов и повторного окисления осадка составляет 13,5 ч, удельное энергопотребление – 12,2 кВт·ч/л, степень выхода минеральных макроэлементов и железа – более 90 и 80 % соответственно. Данные показатели удовлетворяют требованиям организации массообменных процессов внутри ЗСЖО, поэтому разработанная технология является перспективной для включения в структуру замкнутых экосистем, так как расширяет функциональные возможности физико-химического блока в области переработки органических отходов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИБФ СО РАН по теме № 56.1.4. на 2013–2020 годы.

Acknowledgements. This work was conducted in the framework of the Institute of Biophysics SB RAS State task theme № 56.1.4. for 2013–2020.

Библиографические ссылки

1. Перспективы использования «мокрого» сжигания органических отходов в пероксиде водорода для замкнутых систем жизнеобеспечения / С. В. Трифонов [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. № 2 (22). С. 203–208.

2. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A. Bioassay of products of organic waste mineralization: An approach for closed ecosystems // Ecological Engineering. 2016. Vol. 91. P. 139–142.

3. Пат. 2111939 Российская Федерация, МКИ^6 C 05 F 3/00. Способ утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящий к получению из них удобрений / Куденко Ю. А., Павленко Р. А. № 96114242/13 ; заявл. 10.07.96 ; опубл. 27.05.98, Бюл. № 15. 4 с.

4. Замкнутая система: человек – высшие растения / под ред. Г. М. Лисовского. Новосибирск : Наука, 1979. 160 с.

5. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. Man-made Closed Ecological Systems. Taylor & Francis Inc., 2003. 400 p.

6. Trifonov S. V., Kudenko Y. A., Tikhomirov A. A. Prospects for using a full-scale installation for wet combustion of organic wastes in closed life support systems //

Life Sciences in Space Research. 2015. Vol. 7. P. 15–21. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.lssr.2015.08.003.

7. Пат. 141130 Российская Федерация. C 05 F 3/00. Устройство утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящее к получению из них удобрений / Трифонов С. В., Куденко Ю. А., Тихомиров А. А., Дегерменджи А. Г. № 2013154367/13 ; заявл. 06.12.13 ; опубл. 27.05.15, Бюл. № 15. 4 с.

8. Кабальский В. Н. Выращивание рыб в малых водоемах фермерских хозяйств // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2013. № 14 (19). С. 69–73.

9. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems / A. A. Tikhomirov [et al.] // Doklady Biochemistry and Biophysics. 2016. Vol. 470. P. 316–318. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

10. Физико-химическая переработка экзометаболитов человека для замкнутых систем жизнеобеспечения / Е. Ф. Сутормина [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2011. Т. 19. С. 413–420.

11. Assessment of Composition and Toxicity for Plants of Gases Produced during Physicochemical Processing of Human Exometabolites as Applied to Biotechnical Life Support Systems / A. A. Tikhomirov [et al.] // Doklady Biochemistry and Biophysics. 2011. Vol. 441. P. 252–254. DOI: 10.1134/S1607672911060032.

12. Электросинтез перекиси водорода из кислорода в газодиффузионных электродах в растворах минерализованных экзометаболитов / Г. А. Колягин [и др.] // Электрохимия. 2013. № 10 (49). С. 1120–1124. DOI: 10.7868/S0424857013100095.

13. Characteristics of the soil-like substrates produced with a novel technique combining aerobic fermentation and earthworm treatment / W. Kang [et al.] // Advances in Space research. 2012. Vol. 50. P. 1495–1500. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.038.

14. Velichko V. V., Tikhomirov A. A., Ushakova S. A. Estimating CO2 gas exchange in mixed age vegetable plant communities grown on soil-like substrates for life support systems // Life Sciences in Space Research, 2017. Article in press. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.11.001.

15. Light intensity and production parameters of phytocenoses cultivated on soil-like substrate under controlled environment conditions / A. A. Tikhomirov [et al.] // Advances in Space Research. 2003. № 31 (7). P. 1775–1780. DOI: https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)80020-0.

16. Use of human wastes oxidized to different degrees in cultivation of higher plants on the soil-like substrate intended for closed ecosystems / A. A. Tikhomirov [et al.] // Advances In Space Research. 2010. Vol. 46. P. 744–750. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.024.

References

1. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Klevetz V. V. [Prospects of using organic wastes “wet” incineration in hydrogen peroxide for closed life support systems]. *Khimia v interesakh ustoichivogo razvitia.* 2014, Vol. 2 (22), P. 203–208 (In Russ.).

2. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A. Bioassay of products of organic waste mineralization: An approach for closed ecosystems. *Ecological Engineering*. 2016, Vol. 91, P. 139–142.

3. Kudenko Ju. A., Pavlenko R. A. *MKI6 C 05 F 3/00 Sposob utilizatsii otkhodov zhiznedeyatel’nosti cheloveka i nes’’edobnoy biomassy rasteniy, privodyashchiy k polucheniyu iz nikh udobreniy* [Way of utilization of human wastes and inedible plant biomass, gaining hydroponic fertilizer]. Patent No 2111939, Russia, 1996.

4. Lisovsky G.M. et al. *Zamknutaya sistema: chelovek – vysshiye rastenya*. [A closed system: human – higher plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, P 160.

5. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. *Man-made Closed Ecological Systems*. Taylor & Francis Inc., 2003, 400 p.

6. Trifonov S. V., Kudenko Y. A., Tikhomirov A. A. Prospects for using a full-scale installation for wet combustion of organic wastes in closed life support systems. *Life Sciences in Space Research*. 2015, Vol. 7, P. 15–21. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.lssr.2015.08.003.

7. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Degermendzi A. G. *A device for treatment of human wastes and inedible plant biomass for production of fertilizers*. Patent No 141130, Russia, 2013.

8. Kabalskiy V. N. [Fish cultivation in small ponds on farms]. *Vestnik Rossiyskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2013, Vol. 14 (19), P. 69–73 (In Russ.).

9. Tikhomirov A. A., Trifonov S. V., Morozov E. A. et al. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016, Vol. 470, P. 316–318. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

10. Sutormina E. F. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Ivanova Yu. A., Pinaeva L. G., Tikhomirov A. A., Isupova L. A. [Physico-chemical treatment of human exometabolites for closed life support systems]. *Khimia v interesakh ustoichivogo razvitiya.* 2011, Vol. 19, P. 413–420 (In Russ.).

11. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Degermendzhi A. G., Trifonov S. V., Sutormina E. F., and Ivanova Yu. A. Assessment of Composition and Toxicity for Plants of Gases Produced during Physicochemical Processing of Human Exometabolites as Applied to Biotechnical Life Support Systems. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2011, Vol. 441, P. 252–254. DOI: 10.1134/S1607672911060032.

12. Kolyagin G. A., Kornienko V. L., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Trifonov S. V. [Electrosynthesis of hydrogen peroxide from oxygen in gas-diffusion electrode in solutions of mineralized exometabolites]. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2013, Vol. 49, No. 10, P. 1120–1124 (In Russ.). DOI: 10.7868/S0424857013100095.

13. Kang W., He W., Li L.,Hong L. Characteristics of the soil-like substrates produced with a novel technique combining aerobic fermentation and earthworm treatment. *Advances in Space research*. 2012, Vol. 50, P. 1495–1500. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.038.

14. Velichko V. V., Tikhomirov A. A., Ushakova S. A. Estimating CO_2 gas exchange in mixed age vegetable plant communities grown on soil-like substrates for life support systems. *Life Sciences in Space Research*. 2017. Article in press. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.11.001.

15. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Gribovskaya I. A., Tirranen L. S., Manukovsky N. S., Zolotukhin I. G., Karnachuk R. A., Gros J.-B., Lasseur Ch. Light intensity and production parameters of phytocenoses cultivated on soil-like substrate under controlled environment conditions. *Advances in Space Research*. 2003, No. 31 (7), P. 1775–1780. DOI: https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)80020-0.

16. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Ushakova S. A. et al. Use of human wastes oxidized to different degrees in cultivation of higher plants on the soil-like substrate intended for closed ecosystems. *Advances In Space Research*. 2010, Vol. 46, P. 744–750. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.024.

© Трифонов С. В., Морозов Е. А., Мурыгин А. В., Тихомиров А. А., 2017

Раздел
Part
4

ЭКОНОМИКА

ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

УДК 327

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 958–967

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ НА МЕЗОУРОВНЕ: ГЕНЕЗИС, ПРИНЦИПЫ, ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ

О. И. Бабина

Сибирский федеральный университет, Институт управления бизнес-процессов и экономики
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10
E-mail: babina62@yandex.ru

Своевременное принятие правильных решений при изменении экономической ситуации и выработка рациональных вариантов экономической политики являются одними из главных условий эффективного управления регионом. Эффективное управление, в свою очередь, невозможно представить без стратегического планирования. Зарубежными и отечественными исследователями достаточно полно сформулированы теоретико-методологические основы стратегического планирования. Однако анализ наиболее популярных работ по стратегическому планированию показал отсутствие единой теоретической и практической базы применения данного метода для решения задач региона. Данная научная работа выполнена на базе информации, полученной из монографий, материалов международных и российских научных конференций, информационных справочных источников, научных публикаций в текущей и периодической печати, нормативно-правовых актов Российской Федерации. К основным методам, применяемым в данной работе, следует отнести метод системного анализа, обобщение и классификацию, теорию и методы принятия решений, метод сравнительного анализа. Дополнено и уточнено понятие «стратегическое планирование региона», расширен перечень существующих принципов стратегического планирования. Исследованы современные проблемы организации и проведения регионального стратегического планирования. Проанализированы основные методы планирования на мезоуровне с выявлением их преимуществ и недостатков. На основе проведенного анализа можно отметить, что при планировании деятельности таких сложных систем, как региональные, необходимо не только наличие эффективных методов и моделей принятия решений, но и использование современных информационных технологий. От этого во многом зависит качество принятия управленческих решений.

Ключевые слова: стратегическое планирование, регион, проблемы стратегического планирования, принципы, методы стратегического планирования.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 958–967

STRATEGIC PLANNING AT THE MESOLEVEL: GENESIS, PRINCIPLES, PROBLEMS AND METHODS

O. I. Babina

Siberian Federal University, Institute of Business Management and Economy
79/10, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: babina62@yandex.ru

Timely adoption of correct decisions at change of an economic situation and development of rational options of economic policy is one of the main conditions of effective regional management. Effective management, in turn, can not be presented without strategic planning. Foreign and domestic researchers have fully formulated theoretical and methodological bases of strategic planning. However the analysis of the most popular works on strategic planning has shown lack of uniform theoretical and practical application base of this method for the problems solution of the region. This scientific work is performed on the basis of information obtained from monographs of materials of the international and Russian scientific conferences, information help sources, scientific publications in current and periodicals, normative legal acts of the Russian Federation. It is necessary to carry to the main methods applied to this work: method of the system analysis, generalization and classification, theory and methods of decision-making, method of the comparative analysis. In the article the concept "strategic planning of the region" is added and specified, the list of the existing principles of strategic planning is expanded. Modern problems of the organization and carrying out regional strategic planning are investigated. The main methods of planning at the mesolevel with detection of their advantages and shortcomings are analyzed. On the basis of the carried-out analysis it is possible to note that when planning activity of such difficult systems as regional, not only existence of effective methods and models of decision-making, but also use of modern information technologies is necessary. Quality of adoption of administrative decisions in many respects depends on it.

Keywords: strategic planning; region; problems of strategic planning; principles; methods of strategic planning.

Введение. Современная экономическая ситуация в большинстве стран характеризуется высоким уровнем динамики, нестабильностью и неопределенностью развития внешних условий. Конкуренция постоянно усиливается и требует от региона быстрого реагирования на изменения микро- и макросреды. Своевременное принятие правильных решений при изменении экономической ситуации и выработка рациональных вариантов экономической политики являются одними из главных условий эффективного управления регионом. Эффективное управление, в свою очередь, невозможно представить без стратегического планирования.

Зарубежными и отечественными исследователями достаточно полно сформулированы теоретико-методологические основы стратегического планирования. Однако анализ наиболее популярных работ по стратегическому планированию показал отсутствие единой теоретической и практической базы применения данного метода для решения задач региона. Это обусловило выбор темы и актуальность настоящего исследования.

Стратегическое планирование на мезоуровне: генезис. В современных условиях рынка, характеризующихся ростом конкуренции, возрастает роль рационального управления социально-экономической деятельностью региона. Одним из факторов успеха работы в таких условиях является осуществление эффективной организации процессов регионального стратегического планирования. Стратегическое планирование является необходимым элементом обеспечения эффективного развития региона, поскольку оно позволяет заблаговременно учесть факторы и обстоятельства, оказывающие влияние на социально-экономические показатели, и обеспечить подходящие условия для развития.

В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе существует множество определений понятия «стратегическое планирование региона», раскрывающих его сущность. Однако анализ научной литературы показал отсутствие единого мнения по содержанию данного понятия, что объясняется его комплексностью и многоаспектностью. В Федеральном законе от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» стратегическое планирование представляет собой регламентируемую законодательством Российской Федерации деятельность федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления с участием профессиональных союзов и объединений работодателей, общественных, научных и иных организаций по государственному прогнозированию, программно-целевому и территориальному планированию, а также мониторингу реализации документов государственного стратегического планирования, направленную на решение задач устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации и укрепления национальной безопасности [1].

С точки зрения государства, стратегическое планирование – оптимальное распределение ресурсов для достижения поставленных федеральной политикой целей по основным направлениям социально-экономического развития Российской Федерации (регионы, муниципалитеты, отрасли) на долгосрочную перспективу и формирование механизма по их реализации [2]. К. Нареп и В. Ри-Сойвер определяют стратегическое планирование как процесс, который позволяет повысить эффективность деятельности государственного аппарата. Более того, стратегическое планирование выступает своего рода гарантией демократических ценностей [3]. Л. М. Эдвардс приводит следующее определение: «Стратегическое планирование представляет собой общепризнанный и поощряемый процесс в деятельности органов государственной власти» [4]. По мнению Б. Даллаго стратегическое планирование можно определить как деятельность государственного управления, цель которой – привести по истечении определенного времени к желаемому состоянию национальную экономику в целом [5].

С точки зрения А. М. Белянова, В. А. Бирюкова, В. Н. Черковеца стратегическое планирование – это процесс определения целей и приоритетов, а также значений экономических показателей по наиболее важным направлениям социально-экономического развития страны (региона) на длительную перспективу или средний срок с одновременным формированием основ механизма их реализации [6].

В общем виде стратегическое планирование можно определить как процесс разработки стратегического плана путем формулирования целей и критериев управления, анализа проблем и среды развития, разработки стратегических идей и конкурентных преимуществ, выбора сценариев и базовых стратегий развития, прогнозирования социально-экономического развития, расчета потребностей в ресурсах и инвестициях, составления бюджета региона, разработки целевых комплексных программ и расчета качества жизни населения для обеспечения эффективного функционирования региона [7].

В то же время стратегическое планирование можно определить как процесс разработки стратегического плана с помощью постановки целей, выявления критериев управления, мониторинга проблем и изучения среды развития с последующей разработкой стратегических идей и выделения конкурентных преимуществ и базовых стратегий развития. В процессе стратегического планирования составляется прогноз социально-экономического развития, разрабатываются комплексные целевые программы для расчета качества жизни всего населения, чтобы максимально эффективно обеспечить функционирование того или иного региона [8]. По мнению Д. С. Львова, А. Г. Гранберга, А. П. Егоршина [7] стратегическое планирование региона – это процесс разработки стратегического плана путем формулирования целей и критериев управления, анализа проблем и среды, определения стратегических идей и конкурентных преимуществ, выбора сценариев и базовых стратегий развития, прогнозирования социально-экономического развития.

В работе [9] указано, что стратегическое планирование есть процесс определения целей и приоритетов, а также значений экономических показателей по основным, наиболее важным направлениям социально-экономического развития страны (региона) на длительную перспективу или на средний срок с одновременным формированием основ механизма их реализации.

Как и управление, стратегическое планирование региона – это вид управленческой деятельности, направленный на достижение поставленных целей

управления в условиях нестабильной, конкурентной, рыночной среды, включающий диагностический анализ состояния региона, стратегическое планирование и реализацию выбранной стратегии [7]. Кроме того, В. Г. Поляков считает, что стратегическое планирование социально-экономического развития региона – это новая, формирующаяся классика управленческой деятельности. Она означает, что каждый регион будет искать свой вариант реализации стратегического планирования, свой путь к социально-экономическому процветанию, исходя из конкретной экономической, социальной, культурной и управленческой ситуации [10].

С точки зрения А. Г. Степанова, стратегическое планирование комплексного социально-экономического развития региона представляет вид управленческой деятельности, состоящий в разработке таких целей развития на стратегическую перспективу и определении механизмов их достижения, реализация которых призвана обеспечить его эффективное функционирование в условиях изменяющейся внешней и внутренней среды с целью достижения сбалансированности национальных интересов и интересов местного сообщества [11]. Е. В. Чмышенко полагает, что стратегическое региональное планирование представляет вид управленческой деятельности, направленный на формирование таких целей развития региона и механизмов их достижения, реализация которых призвана обеспечить удовлетворение потребностей целевых сегментов региона [12].

Стратегическое планирование одновременно выступает как практическая деятельность, связанная с разработкой стратегических решений по развитию отдельных сфер и объектов прогнозирования, реализация которых обеспечивает их эффективное функционирование в долгосрочной перспективе. Результатом этой деятельности является стратегический план [13].

В научной литературе также отмечается, что в понимании стратегического планирования необходимо избежать двух крайностей: с одной стороны, понимания стратегического планирования как обычного долгосрочного планирования (т. е. все особенности которого связаны исключительно с большим временным сроком), а с другой стороны, сведения стратегического планирования к набору нечетких, лишь качественно охарактеризованных направлений социально-экономического развития без указания каких-либо конкретных мероприятий, обеспечивающих достижение поставленных целей [14].

А. С. Ларионова определяет сущность стратегического планирования следующим образом: «Стратегическое планирование – это процесс объективного обоснования системы наиболее приоритетных целей развития экономического субъекта (домохозяйства, организации, государства в целом) и методов их наиболее эффективного достижения» [15]. П. В. Магданов под стратегическим планированием понимает «систему знаний, относящихся к процессам определения будущего и планирования развития какого-либо экономического субъекта и к процессам разработки и контроля выполнения мероприятий по развитию данного субъекта» [16].

Проанализировав основные определения понятия «стратегическое планирование региона», можно сделать вывод о том, что легальная дефиниция стратегического планирования в настоящее время не выработана окончательно. Таким образом, как представителями науки, так и законодателями, действующими на основании научных разработок, в настоящее время предлагается множество интерпретаций стратегического планирования. При этом все они в чем-то схожи. Однако заметим, что в данных определениях отсутствует направленность на новые функциональные возможности, которые появились в современных программных продуктах за последнее десятилетие. Это обстоятельство позволяет дать авторскую трактовку понятия «стратегическое планирование региона», основанную на анализе существующих подходов к сущности и содержанию стратегического планирования с учетом новых трендов: стратегическое планирование региона – это процесс управленческой деятельности социально-экономического развития региона, позволяющий исследовать его внутренние процессы путём проведения серии компьютерных экспериментов с помощью метода имитационного моделирования и выбирать из совокупности допустимых решений оптимальный вариант дальнейшего развития региона. Уточнение содержания понятия «стратегическое планирование региона» способствует более правильному пониманию его сущности в современных условиях.

Стратегическое планирование на мезоуровне: принципы. Процесс планирования базируется на ряде принципов, которые необходимо учитывать при его осуществлении. Основные и дополнительные авторские принципы регионального стратегического планирования систематизированы и представлены в табл. 1. Расширение перечня существующих в научной литературе принципов развивает теоретическую и формирует методическую основы в данной области. Под данными дополнительными принципами следует понимать основные теоретико-методологические положения, которыми следует руководствоваться в процессе стратегического планирования на региональном уровне, используя технологию имитационного моделирования.

Стратегическое планирование на мезоуровне: проблемы. Далее рассмотрим основные проблемы организации и проведения стратегического планирования, встречающиеся при планировании социально-экономического развития региона. Анализ литературы [8; 10–13; 22–26] показал, что их можно систематизировать в виде семи наиболее распространенных групп проблем (табл. 2): 1) обусловленные недостаточным уровнем методического обеспечения; 2) связанные с неучетом макроэкономических показателей в плановой деятельности и агрегированностью других показателей; 3) связанные с разрозненностью планов на разных уровнях власти; 4) связанные с проведением стратегического планирования на безальтернативной основе; 5) связанные с отсутствием стратегических представлений по отношению к будущему состоянию и развитию региона; 6) связанные с формальным подходом к стратегическому планированию; 7) проблемы планирования, связанные с кадрами.

Таблица 1

Принципы регионального стратегического планирования

Существующие принципы стратегического планирования на мезоуровне		
№ п/п	Автор	Принципы
1	И. Ансофф [17]	Системности, комплексности, оптимальности, адаптивности, ограниченности ресурсов, целесообразности, баланса интересов, эффективности, легитимности (законности), профессионализма
2	В. Е. Селиверстов [18]	Системности, социальной доминантности, партнерства, научности, объективности и доказательности, институционализации, повышения конкурентоспособности, открытости и информационной доступности, инновационности
3	О. О. Смирнова [19]	Непрерывности
4	С. Ю. Зеленцова, В. Е. Кирьянчук, А. Э. Крупко [20]	Альтернативности, многовариантности, программности, сопоставимости показателей прогнозирования, комбинированности (многоуровневости)
5	З. В. Разилов [21]	Существенности, сбалансированности, адекватности
Дополнительные принципы стратегического планирования на мезоуровне, сформулированные автором		
№ п/п	Название принципа	Описание
1	Наличие исходных данных	Наличие достаточного количества исходных данных для осуществления процесса стратегического планирования региона
2	Учёт случайных факторов	Возможность учёта случайных факторов, воздействующих на процессы социально-экономического развития региона
3	Сравнение альтернатив	Необходимость сравнения различных альтернативных стратегий на стадии регионального стратегического планирования
4	Разнообразие планов	Разработка разных видов планов регионального развития с помощью технологии имитационного моделирования
5	Гибкость корректировки	Возможность гибкой корректировки показателей и координации планово-экономической деятельности посредством технологии имитационного моделирования
6	Точность показателей	Определение с достаточной степенью подробности всех планируемых показателей

1. Первую группу формируют проблемы, связанные с методическим обеспечением. Анализ проблемных ситуаций показал, что узкими местами системы стратегического территориального управления являются методические аспекты процессов планирования. Е. В. Чмышенко считает, что отсутствие методического аппарата разработки стратегических региональных планов приводит к нагромождению в планах различных теоретических посылок, абстрактному формулированию целей, задач и индикаторов, громоздкому описанию методов исследования и анализа ситуации, высокой степени формализации, заключающейся в расчете большого количества коэффициентов и показателей, как правило, не связанных между собой [12]. Для обеспечения высокого качества стратегических, программных и прогнозных документов следует обеспечить процесс стратегического планирования необходимой методической базой по всему кругу планирования [23]. Кроме того, в настоящее время методическое обеспечение процессов регионального стратегического планирования представлено методическими указаниями и инструкциями расчета плановых показателей, и, как правило, они не содержат методических рекомендаций по разработке планов, а только указывают правила их оформления, что вызывает определенные трудности в их применении на практике. Кроме того, при стратегическом планировании региона используются устаревшие методики, разработанные в конце 80-х – начале 90-х гг., при этом современные методики, адаптированные к условиям российского рынка, учитывающие современные условия регионального развития России, практически не используются.

2. Вторую группу представляют проблемы, связанные с неучетом макроэкономических показателей в плановой деятельности и агрегированностью других.

В условиях перехода к рыночной экономике резко снизилось качество плановой региональной деятельности. Это связано с рядом факторов, прежде всего, с неучётом многих социально-экономических показателей и их агрегированностью, а также с использованием в стратегических документах слишком общих целевых показателей, которые не позволяют в полной мере осуществлять мониторинг их достижения. И. Е. Рисин считает, что в большинстве регионов необходимый для реализации стратегий механизм управления в лучшем случае определяется в агрегированном формате, исключающем развернутую характеристику его основных составляющих – форм и инструментов управления, тем более впервые вводимых в практику [24]. Это связано прежде всего с тем, что разработчики стратегий стали осторожнее подходить к установлению целевых индикаторов, чтобы повысить вероятность их достижения. Это приводит к тому, что количество целевых индикаторов в стратегических документах уменьшается, и снижаются их целевые значения показателей развития. П. В. Магданов, В. Ю. Падей видят решение этих задач в целесообразности создании постоянно действующей группы специалистов, имеющей свободный доступ к самым разным информационным источникам. Аналитическая работа должна быть поставлена на системную основу, ее результатами должны пользоваться не только органы власти, но и коммерческие структуры [25].

3. Проблемы, связанные с разрозненностью планов на разных уровнях власти. Одной из главных проблем в региональном стратегическом планировании является отсутствие органической связи между стратегическим планированием на разных уровнях управления социально-экономическим развитием территорий (федеральным центром и субъектом Федерации, субъектом Федерации и муниципальным образованием) [12]. Зачастую считается, что стратегический план является совокупностью принимаемых независимо друг от друга решений, поэтому общий стратегический план остается совокупностью планов, подготовленных автономно каждым входящим в него муниципальным образованием. И хотя управление регионом формально осуществляется сверху-вниз, стратегическое планирование происходит снизу-вверх путем составления и обобщения разрозненных планов разных муниципальных образований. Кроме того, причиной низкой оперативности подготовки общего стратегического плана развития региона является отсутствие четкой системы подготовки и передачи плановой информации от одного субъекта управления к другому, необходимость долгих процедур итерационного согласования стратегических планов, недостаток и недостоверность информации. П. В. Магданов, В. Ю. Падей полагают, что для обеспечения результативности стратегии развития региона следует организовать процесс стратегического планирования в муниципальных образованиях. Документально оформленная стратегия развития муниципального образования должна стать составной частью стратегии социально-экономического развития субъекта РФ [25].

4. Проблемы, связанные с проведением стратегического планирования на безальтернативной основе.

По мнению Е. В. Чмышенко, самым редким элементом в региональных стратегических планах является выбор конкретных стратегических альтернатив. Так, например, исследования, проведенные И. А. Николаевым и О. С. Точилкиной, показывают, что при анализе стратегий соотношение необходимых элементов, таких как анализ внешней среды и выбор конкретных стратегических альтернатив, есть у восьми регионов из 64, что составляет 13 % от количества обследуемых регионов [12]. В практике управления регионом спланировать всё многообразие принятия решения невозможно, да и нецелесообразно. Причиной тому могут служить два фактора: несоизмеримость затрат на стратегическое планирование с результатами, получаемыми после выполнения плана; отсутствие достаточной, объективной и достоверной информации для разработки плана. Однако осуществление стратегического планирования на безальтернативной основе наносит больший вред социально-экономическому развитию региона. Возможность рассмотрения множества вариантов позволяет оценить альтернативные пути развития региона и выбрать оптимальные для достижения поставленных целей.

5. Проблемы, связанные с отсутствием стратегических представлений по отношению к будущему состоянию и развитию региона.

Одной из самых важных проблем является отсутствие учета в процессе разработки и реализации программ социально-экономического развития процессов глобализации мировой экономики и необходимости интеграции в последнюю региональных экономик России. Вследствие этого разработанная стратегия оказывается невостребованной, так как теряется ее ведущая роль из-за неприменения стратегического мышления в процессе стратегического регионального планирования. Без стратегического видения сложно определить цели и задачи, отобрать альтернативы развития, сформировать портфель проектов. Кроме того, это приводит к тому, что сложно сформулировать дальнейшие перспективы будущего и соответствующие ему стратегические инициативы. Видение будущего и стратегические инициативы очень важны и для региональных органов власти, поскольку принимаемые решения должны иметь общее направление, соответствовать сути стратегии развития и быть взаимно согласованными. Видение будущего как раз и выступает критерием соответствия и общей направленности предпринимаемых региональными властями действий.

6. Шестая группа связана с формальным подходом к стратегическому планированию. Российская практика показывает, что нередко регионы формально подходят к разработке стратегических планов своего развития, в связи с этим имеются значительные отклонения фактических показателей от запланированных. Кроме того, практика современных российских стратегических планов и программ развития региона показывает, что процесс стратегического планирования осуществляется формально. По мнению Б. Райзберга, стратегическое государственное планирование сводится к формальной разработке периодически обновляемой среднесрочной программы социально-экономического развития, принятию недофинансируемых и не выходящих на конечные индикаторы федеральных целевых программ [26]. На наш взгляд, для того чтобы этого избежать, необходимо постоянно сравнивать план с фактическими данными, анализировать отклонения, усиливать благоприятные и уменьшать неблагоприятные тенденции, совершенствовать процедуры регионального стратегического планирования.

7. Седьмая группа проблем связана с кадрами. Наличие квалифицированных специалистов отдела стратегического планирования является одним из важнейших в плановой деятельности региона. Эффективность плановой деятельности определяется в том числе и личными качествами плановиков, их интуицией, новаторством, изобретательностью, опытом, способностью к творчеству. В настоящее же время региональное стратегическое планирование довольно часто осуществляется специалистами, которые не используют в своей профессиональной деятельности современные инструменты планирования. Вопрос неквалифицированности кадров актуален, но решаем посредством непрерывного повышения квалификации специалистов отдела планирования. Проблемы планирования деятельности предприятия существуют и на уровне высшего руководства региона. Существенным недостатком такого подхода является низкая вовлеченность высшего руководства в анализ существующего состояния, проблем и перспектив социально-экономического развития региона, а также в сам процесс планирования.

Проведенное исследование показало, что региональное стратегическое планирование в настоящее время является необходимым условием повышения эффективности государственного управления регионом, а названные проблемы существенно снижают эффективность и результативность процесса стратегического планирования, нарушают связи между документами, а также препятствуют их согласованию различными участниками взаимодействия. Кроме того, обзор документов стратегического планирования в России показал, что в системе регионального стратегического планирования существуют серьезные недостатки, связанные с организацией привлечения внешних экспертов и общественных обсуждений, мониторинга и контроля. В результате сохраняется высокий риск того, что разработанные документы стратегического планирования имеют формальный характер.

Проведенный выше анализ и полученные на его основе выводы позволяют выделить главную проблему регионального стратегического планирования в современных условиях развития экономики: отсутствие эффективной системы стратегического планирования региона, которая должна базироваться на обновленном методическом, информационном и организационном обеспечении, использовать современные инструменты планирования, основанные на соответствующих математических методах. Кроме того, обозначенная проблема указывает реальную потребность в создании соответствующих моделей, позволяющих исследовать комплексное социально-экономическое развитие региона и выработать стратегии управления им.

Стратегическое планирование на мезоуровне: методы. Методы стратегического планирования основываются на решениях об утверждении планов. Планы являются результатами управленческих решений, которые принимаются на основе плановых альтернатив. Принятие управленческого решения осуществляется по ряду критериев, использование которых позволяет оценить альтернативы с точки зрения достижения целей.

В настоящее время существует более 200 методов планирования, из которых в основном находят практическое применение не более 10−20 методов. В отечественной теории и практике существуют следующие методы стратегического планирования на мезоуровне [27–29]: метод Дельфи, Форсайт, нормативный, SWOT-анализ, PEST-анализ, сценарный метод, метод экстраполяции и имитационный. Основные преимущества и недостатки данных методов стратегического планирования региона представлены в табл. 3.

Таблица 2

Современные проблемы регионального стратегического планирования и пути решения

№ п/п	Проблемы	Пути решения
1	Недостаточный уровень методического обеспечения	Разработка методических рекомендаций по составлению плана Унификация методического подхода к стратегическому планированию региона
2	Неучёт макроэкономических показателей и агрегированность других показателей	Учёт в стратегическом планировании макроэкономических показателей Предоставление показателей социально-экономического развития в развернутом виде
3	Разрозненность планов на разных уровнях власти	Сравнение плана с фактическими данными Организация стратегического планирования на всех уровнях власти
4	Проведение планирования на безальтернативной основе	Применение новых инструментов в планировании, в частности, метода имитационного моделирования Учёт случайных факторов в стратегическом планировании
5	Отсутствие стратегических представлений по отношению к будущему состоянию и развитию	Учет в процессе разработки и реализации программ социально-экономического развития процессов глобализации мировой экономики
6	Формальный подход к стратегическому планированию	Совершенствование процедур планирования Повышение роли планирования для региона Мотивация заинтересованности в планировании
7	Кадры	Профессиональная подготовка и переподготовка плановиков Привлечение внешних консультантов и руководство региона Привлечение специалистов высшей квалификации к планированию

Таблица 3

Методы стратегического планирования региона

Методы планирования	Преимущества	Недостатки
Метод Дельфи	Анонимность оценок экспертов, их аргументации и критики Обеспечивает статистическую обработку оценок участников опроса Групповое принятие решения	Не подходит для проведения большого количества вычислений и сравнения различных альтернативных стратегий Успех метода зависит от квалификации экспертов

Окончание табл. 3

Методы планирования	Преимущества	Недостатки
Форсайт	Групповое обсуждение предполагаемых изменений в будущем и совместное принятие решения Оценивает риски	Значительные финансовые и временные затраты на проведение исследования Невозможно использовать, если показатели не имеют определенную стабильность во времени и формируют базовые условия развития региона Невозможность наблюдать за развитием региона или отдельных его муниципальных образований в течение определённого периода, в том числе с изменением скорости протекания процессов
Нормативный метод	В плановых расчетах предполагает использование абсолютных и относительных норм и нормативов Актуален при разработке плана налоговых и других выплат, расчете плановых показателей по труду и заработной плате, обосновании инвестиционных проектов	Не подходит для проведения большого количества вычислений и сравнения различных альтернативных стратегий Не позволяет проводить дополнительные исследования планов и стратегий, разработанных с помощью стандартных методов планирования
SWOT-анализ	Имеет широкое применение на уровне территорий, отраслей и народного хозяйства в целом Простота, доступность и наглядность метода	Невозможность учёта случайных факторов при планировании Невозможность наблюдать за развитием региона или отдельных его муниципальных образований в течение определённого периода, в том числе с изменением скорости протекания процессов
PEST-анализ	Детальный анализ внешней среды при исследовании Учёт внешних факторов воздействия на исследуемую систему	Подходит только для анализа долгосрочных целей Не позволяет проводить дополнительные исследования планов и стратегий, разработанных с помощью стандартных методов планирования Не подходит для проведения большого количества вычислений и сравнения различных альтернативных стратегий
Сценарный метод	Перебирает все возможности, достижимые из конкретного исходного состояния Наглядность метода Разработка сценария доступна одновременно большой группе людей	Невозможность учёта случайных факторов при стратегическом планировании региона Не позволяет проводить дополнительные исследования планов и стратегий, разработанных с помощью стандартных методов планирования
Метод экстраполяции	Используется при стабильном и предсказуемом изменении показателей в перспективе Широкое применение за счёт простоты, возможности осуществления на основе о небольшого объема информации	Невозможность наблюдать за развитием региона или отдельных его муниципальных образований в течение определённого периода, в том числе с изменением скорости протекания процессов Не подходит для проведения большого количества вычислений и сравнения различных альтернативных стратегий
Имитационный метод	Сравнение различных альтернативных стратегий на уровне стратегического планирования региона Возможность получения оценки изменчивости выходных результатов модели Возможность исследования сложных сценариев поведения системы Изучение новых ситуаций в регионе либо оценка его функционирования в новых условиях Возможность учёта случайных факторов, воздействующих на процессы стратегического планирования региона Подходит для проведения дополнительных исследований планов и стратегий, разработанных с помощью стандартных методов планирования	Решение задачи с помощью имитационного моделирования требует оценить большое количество возможных альтернативных решений Существует опасность неадекватности установленной связи между некоторыми параметрами модели и реальной ситуации. В реальных условиях выявленная связь может не повторяться или носить другой характер Невозможность описания протекающих в системе процессов регионального стратегического планирования в аналитической форме Требует наличия достаточного количества исходных данных для моделирования Разработка модели требует значительных денежных, временных затрат и квалифицированного персонала

Таким образом, анализ только наиболее распространенных методов стратегического планирования региона позволил выявить широкий спектр преимуществ и недостатков их применения. Это еще раз подтверждает, что проблема выбора и тем более комбинирования техник проведения регионального стратегического планирования еще долго будет оставаться одной из центральных проблем исследования этой технологии. Из табл. 3 видно, что в современных экономических условиях, применяя перечисленные выше методы регионального стратегического планирования, трудно получить практически ценные результаты по следующим причинам: в большинстве своем методы не учитывают случайных факторов при стратегическом планировании; не позволяют наблюдать за деятельностью региона или отдельных его муниципальных образований в течение определённого периода (в том числе, с изменением скорости протекания процессов); не подходят для проведения большого количества вычислений; не позволяют проводить дополнительные исследования планов и стратегий, разработанных с помощью стандартных методов стратегического планирования. Из табл. 3 также видно, что метод имитационного моделирования в решении задач стратегического планирования имеет существенные преимущества перед другими методами. К основным преимуществам данного метода можно отнести возможность сравнения различных альтернативных стратегий при планировании, а также возможность проведения дополнительных исследований планов и стратегий, разработанных с помощью стандартных методов планирования региона. Кроме того, по сравнению с другими методами, метод имитационного моделирования точнее определяет и реагирует на непредсказуемые изменения внешней и внутренней среды, что существенно уменьшает ошибку прогнозирования с помощью данного метода. Что касается недостатков метода, то в качестве основного можно отнести значительные денежные и временные затраты на разработку качественной имитационной модели. Таким образом, несмотря на вышеуказанные недостатки метода, следует заметить, что основным методом прогнозирования регионального развития в современных условиях должен стать метод имитационного моделирования, так как он в большей мере подходит реальным условиям функционирования региона и с помощью него можно достичь более точные результаты при стратегическом планировании.

Заключение. В современных рыночных условиях, характеризующихся высоким уровнем динамики, плохой предсказуемостью, нестабильностью и неопределенностью развития внешних условий, возрастает роль рационального управления социально-экономическим развитием региона. Основной фактор успеха работы в таких условиях – использование стратегического планирования на мезоуровне. Стратегическое планирование является необходимым элементом обеспечения эффективного развития региона, поскольку оно позволяет заблаговременно учесть факторы и обстоятельства, оказывающие влияние на социально-экономические показатели, и обеспечить необходимые условия для развития.

На основе проведенного анализа также следует отметить, что при стратегическом планировании таких сложных систем, как регион, необходимо не только наличие эффективных методов и моделей принятия решений, но и использование современных информационных технологий. От этого во многом зависит качество принятия управленческих решений.

Библиографические ссылки

1. О стратегическом планировании в Российской Федерации [Электронный ресурс]: федер. закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ (с изм. и доп.). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». URL: http://base.garant.ru/70684666/#ixzz4 YicJ97yG (дата обращения: 14.02.2017).
2. Смирнова О. О. Основы стратегического планирования Российской Федерации : монография. М. : Наука, 2013. 302 с.
3. Narep K., Rea-Soiver V. Strategic planning process on central and local level: performance plans as the element of the strategic planning in the public administration in Estoni [Электронный ресурс]. URL: http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/NISPAcee/UNPAN007841.pdf (дата обращения: 14.02.2017).
4. Edwards L. M. Strategic Planning in Local Government: Is the Promise of Performance a Reality? Public Management and Policy Dissertations. 2012. P. 2.
5. Даллаго Б. Есть ли будущее у макроэкономического планирования в Восточной Европе // Российский экономический журнал. 1992. № 4. С. 84–95.
6. Белянова А. М., Бирюков В. А., Черковец В. Н. Стратегическое планирование в условиях современной экономики России : материалы науч. семинара по проблемам стратегического планирования // Вестник Московского университета. Сер. 6. Экономика. 2016. № 3. С. 141–158.
7. Пахомов А. Управление стратегическим планированием // АПК: экономика, управление. 2005. № 6. С. 33–37.
8. Данилина В. С., Осташков А. В. Проблемы стратегического планирования социально-экономического развития региона [Электронный ресурс] // Молодежный научный форум: Общественные и экономические науки : электр. сб. ст. по материалам XXVIII студ. междунар. заочной науч.-практ. конф. 2015. № 9 (28). URL: https://nauchforum.ru/archive/MNF_social/9(28).pdf (дата обращения: 14.05.2017).
9. Петрова И. В., Пинчук В. О. К отдельным вопросам организации системы управления стратегическим планированием на региональном уровне // Российские регионы в фокусе перемен : сб. докладов XI Междунар. конф. : в 2 т. 2017. С. 160–164.
10. Поляков В. Г. Стратегическое планирование социально-экономического развития региона. Проблемы методологии и практический опят регионального стратегического планирования // Российское предпринимательство. 2010. № 11-2. С. 131–135.
11. Степанов А. Г. Макроэкономическое планирование и прогнозирование экономики региона в системе

государственного управления // Менеджмент в России и за рубежом. 2006. № 4. С. 59–64.

12. Чмышенко Е. В. Стратегическое планирование как фактор регионального развития // Вестник Оренбургского государственного университета. 2010. № 1 (107). С. 77–82.

13. Анимица Е. Г. Стратегическое планирование развития территории: сущность, основные принципы, проблемы [Электронный ресурс] // Известия УрГЭУ. 2005. № 12. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/strategicheskoe-planirovanie-razvitiya-territorii-suschnost-osnovnye-printsipy-problemy (дата обращения: 14.02.2017).

14. Бамбаева Н. Я., Борзова А. С. Методика разработки и реализации стратегического плана социально-экономического развития территории // Региональная экономика: теория и практика. 2006. № 7(34). С. 20–24.

15. Ларионова А. С. История и инструментарий стратегического планирования в России [Электронный ресурс] // УЭкС. 2011. № 34. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-i-instrumentariy-strategicheskogo-planirovaniya-v-rossii (дата обращения: 15.04.2017).

16. Магданов П. В. Процесс стратегического планирования в корпорации // Вестник ПГУ. Сер. «Экономика». 2012. № 1. С. 43–49.

17. Ансофф И. Стратегический менеджмент. Классическое издание : монография: пер. с англ. СПб., 2009. 343 с.

18. Селиверстов В. Е. Региональное стратегическое планирование: методология, практика, инструменты, институты : дис. ... д-ра экон. наук. Новосибирск, 2011. 425 с.

19. Смирнова О. О. Концептуальные основы формирования системы стратегического планирования регионального развития Российской Федерации : автореф. дис. ... д-ра экон. наук. М., 2012. 50 с.

20. Зеленцова С. Ю., Кирьянчук В. Е., Крупко А. Э. Многомерное адаптивно-имитационное моделирование в системе прогнозирования социально-экономического развития // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. «Экономика и управление». 2006. № 1. С. 148–154.

21. Разилов З. В. Стратегическое планирование социально-экономического развития территорий : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05. Краснодар, 2009. 166 с.

22. Магданов П. В. Проблемы стратегического планирования социально-экономического развития региона // Стратегии бизнеса. 2014. № 2. С. 108–114.

23. Бекетов Н. В. Проблемы стратегического планирования региональным развитием [Электронный ресурс] // Региональная экономика: теория и практика. 2008. № 35. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/problemy-strategicheskogo-planirovaniya-regionalnym-razvitiem (дата обращения: 16.02.2017).

24. Рисин И. Е. Стратегическое планирование регионального развития: современная практика, направления совершенствования : монография. М. : РУСАЙНС, 2016. 86 с.

25. Магданов П. В., Падей В. Ю. Проблемы стратегического планирования социально-экономического развития региона // Наука и искусство управления : Вестник Института экономики, управления и права Российского государственного гуманитарного университета. 2013. № 3. С. 67.

26. Райзберг Б. Проблемы государственного стратегического планирования в современной России // Общество и экономика. 2008. № 1. С. 104–114.

27. Селиванов А. И., Трошин Д. В. О методологических основаниях реализации Закона РФ от 28.06.2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Экономика. Налоги. Право. 2015. № 3. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/o-metodologicheskih-osnovaniyah-realizatsii-zakona-ot-28-06-2014-172-fz-o-strategicheskom-planirovanii-v-rossiyskoy-federatsii (дата обращения: 27.02.2017).

28. Искендеров А. Р. Методические подходы к стратегическому планированию // Международный журнал. 2009. № 2. С. 49–53.

29. Жаров В. С., Иванова М. В. Проблемы управления социально-экономическим развитием регионов Арктики [Электронный ресурс] // Вестник МГТУ. 2015. № 3. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/problemy-upravleniya-sotsialno-ekonomicheskim-razvitiem-regionov-arktiki (дата обращения: 28.02.2017).

References

1. RF Federal Law “About strategic planning in the Russian Federation” (with changes and additions) of 28 June 2014, № 172-FZ (In Russ.). Available at: http://base.garant.ru/70684666/#ixzz4YicJ97yG (accessed: 14.02.2017).

2. Smirnova O. O. *Osnovy strategicheskogo planirovaniya Rossiyskoy Federatsii: monografiya.* [Bases of strategic planning of the Russian Federation]. Moscow, Nauka Publ, 2013, 302 p.

3. Narep K., Rea-Soiver V. [Strategic planning process on central and local level: performance plans as the element of the strategic planning in the public administration in Estonii]. Available at: http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/NISPAcee/UNPAN007841.pdf (accessed: 14.02.2017).

4. Edwards L. M. Strategic Planning in Local Government: Is the Promise of Performance a Reality? Public Management and Policy Dissertations. 2012, p. 2.

5. Dallago B. [Whether macroeconomic planning has a future in Eastern Europe]. *Rossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal.* 1992, No. 4, P. 84–95 (In Russ.).

6. Belyanov A. M., Kushlin V. A., Cherkovets V. N. [Strategic planning in the conditions of modern economy of Russia (materials of a scientific seminar on problems of strategic planning)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6: Ekonomika.* 2016, No. 3, P. 141–158 (In Russ.).

7. Pakhomov A. [Management of strategic planning]. *APK: Ekonomika, upravlenie.* 2005, No. 6, P. 33–37 (In Russ.).

8. Danilina V. S., Ostashkov A. V. [Problems of strategic planning of social and economic development of the region]. *Molodezhnyy nauchnyy forum: Obshchestvennye i ekonomicheskie nauki: elektr. sb. st. po materialam XXVIII stud. mezhdunar. zaochnoy nauch.-prakt. konf.* [Materials XXVIII student international

scientific and practical conference "Youth scientific forum: Social and economic sciences"]. Moscow, MCNO Publ., 2015, No. 9 (28) (In Russ.). Available at: https://nauchforum.ru/archive/MNF_social/9(28).pdf (accessed: 14.04.2017).

9. Petrova I. V., Pinchuk V. O. [To single questions of the organization of a control system strategic planning at the regional level]. *Rossiyskie regiony v fokuse peremen Sbornik dokladov XI Mezhdunarodnoy konf.*[Materials of the XI Intern. Conference "Russian regions in focus of changes"]. 2017, P. 160–164 (In Russ.).

10. Poljakov V. G. [Strategic planning of social and economic development of the region. Problems of methodology and practical honey agarics of regional strategic planning]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo.* 2010, No. 11-2, P. 131–135 (In Russ.).

11. Stepanov A. G. [Macroeconomic planning and forecasting of economy of the region in the system of public administration]. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom.* 2006, No. 4, P. 59–64 (In Russ.).

12. Chmyshenko E. V. [Strategic planning as factor of regional development]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2010, No. 1 (107), P. 77–82 (In Russ.).

13. Animica E. G. [Strategic planning of development of the territory: entity, basic principles, problems]. *Izvestiya UrGEU.* 2005, No. 12 (In Russ.). Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/strategicheskoe-planirovanie-razvitiya-territorii-suschnost-osnovnye-printsipy-problemy (accessed: 14.02.2017).

14. Bambaeva N. Ja., Borzova A. S. [Technique of development and implementation of the strategic plan of social and economic development of the territory]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2006, No. 7(34), P. 20–24 (In Russ.).

15. Larionova A. S. [History and tools of strategic planning in Russia]. *UEkS.* 2011, No. 34 (In Russ.). Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-i-instrumentariy-strategicheskogo-planirovaniya-v-rossii (accessed: 15.04.2017).

16. Magdanov P. V. [Process of strategic planning in corporation]. *Vestnik PGU. Seriya: Ekonomika.* 2012, No. 1, P. 43–49 (In Russ.).

17. Ansoff I. *Strategicheskiy menedzhment. Klassicheskoe izdanie. Monografiya (perevod s angliyskogo).* [Strategic management. Classical edition]. St. Petersburg, 2009, 343 P.

18. Seliverstov V. E. *Regional'noe strategicheskoe planirovanie: metodologiya, praktika, instrumenty, instituty. Diss. doktora ekonom. nauk.* [Regional strategic planning: methodology, practice, tools, institutes. Dr. econ. sci. diss.]. Novosibirsk, 2011, P. 425.

19. Smirnova O. O. *Kontseptual'nye osnovy formirovaniya sistemy strategicheskogo planirovaniya regional'nogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii. Dis. Dokt. ekonom.* [Conceptual bases of formation of system of strategic planning of regional development of the Russian Federation. Dr. econ. sci. diss]. Moscow, 2012, P. 50.

20. Zelencova S. Ju., Kir'janchuk V. E., Krupko A. Je. [Multidimensional adaptive and imitating modeling in the system of forecasting of social and economic development]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie.* 2006, No. 1, P. 148–154 (In Russ.).

21. Razilov Z. V. *Strategicheskoe planirovanie sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territoriy. Diss. kand. ekonom. nauk* [Strategic planning of social and economic development of territories. Dr. econ. sci. diss.]. Krasnodar, 2009, P. 166.

22. Magdanov P. V. [Problems of strategic planning of social and economic development of the region]. *Strategii biznesa.* 2014, No. 2, P. 108–114 (In Russ.).

23. Beketov N. V. [Problems of strategic planning by regional development]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2008, No. 35 (In Russ.). Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/problemy-strategicheskogo-planirovaniya-regionalnym-razvitiem (accessed: 16.02.2017).

24. Risin I. E. *Strategicheskoe planirovanie regional'nogo razvitiya: sovremennaya praktika, napravleniya sovershenstvovaniya: monografiya* [Strategic planning of regional development: modern practice, directions of improvement]. Moscow, RUSAJNS Publ., 2016, P. 86.

25. Magdanov P. V., Padej V. Ju. [Problems of strategic planning of social and economic development of the region]. *Nauka i iskusstvo upravleniya. Vestnik Instituta ekonomiki, upravleniya i prava Rossiyskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta.* 2013, No. 3, P. 67–76 (In Russ.).

26. Rajzberg B. [Problems of the state strategic planning in modern Russia]. *Obshchestvo i ekonomika.* 2008, No. 1, P. 104–114 (In Russ.).

27. Selivanov A. I., Troshin D. V. [About the methodological bases of implementation of the Law from 28. 06. 2014 No. 172-FZ "About strategic planning in the Russian Federation"]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo.* 2015, No. 3 (In Russ.). Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/o-metodologicheskikh-osnovaniyakh-realizatsii-zakona-ot-28-06-2014-172-fz-o-strategicheskom-planirovanii-v-rossiyskoy-federatsii (accessed: 27.02.2017).

28. Iskenderov A. R. [Methodical approaches to strategic planning]. *Mezhdunarodnyy zhurnal*. 2009, No. 2, P. 49–53 (In Russ.).

29. Zharov V. S., Ivanova M. V. [Problems of management of social and economic development of regions of the Arctic]. *Vestnik MGTU.* 2015, No. 3 (In Russ.). Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/problemy-upravleniya-sotsialno-ekonomicheskim-razvitiem-regionov-arktiki (accessed: 28.02.2017).

© Бабина О. И., 2017

УДК 338.341.018

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 968–975

ВКЛЮЧЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ В ГЛОБАЛЬНЫЕ ЦЕПОЧКИ СОЗДАНИЯ СТОИМОСТИ НА ОСНОВЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

Ю. В. Ерыгин, М. А. Волкова*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: wolfmarius@mail.ru

Рассматриваются вопросы включения региональной экономики в глобальные цепочки создания стоимости на основе государственного стимулирования инновационного развития. Глобальные цепочки создания стоимости играют значительную роль в современной мировой экономике, однако российская экономика включена в процессы международного разделения труда на не слишком выгодных условиях – как поставщик сырья. Сделан вывод о необходимости улучшения международной специализации российской экономики за счет вхождения в глобальные производственные сети на этапе исследования и разработок как разработчика инноваций. Достижению указанной цели будет способствовать изменение подхода к выбору объектов государственного регулирования и инструментов государственного стимулирования инновационных производств. Предложена новая типология секторов региональной экономики как объектов государственного регулирования. Разграничение секторов региональной экономики осуществляется исходя из двух критериев: первый критерий – уровень локализации процесса производства (уровень «включенности» регионального продукта в национальные, региональные и глобальные производственные сети); второй критерий – уровень локализации рынка потребления продукта (регион, макрорегион, национальная экономика, рынок ЕАЭС, СНГ и дальнее зарубежье). В зависимости от типа сектора региональной экономики выделены отдельные направления государственной политики поддержки инновационных производств. Определены принципы взаимодействия между государственными структурами, научно-исследовательскими организациями и бизнес-сообществом при реализации проектов организации производства инновационной продукции. Указанные принципы могут быть использованы при выборе инструментов государственной поддержки инновационных производств.

Ключевые слова: цепочка создания стоимости, глобальная производственная сеть, региональная экономика, государственная поддержка инновационных производств, объект государственного стимулирования.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 968–975

INCLUDING REGIONAL ECONOMY IN GLOBAL VALUE CHAINS ON THE BASE OF GOVERNMENT STIMULATION OF INNOVATION DEVELOPMENT

Y. V. Erygin, M. A. Volkova*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: wolfmarius@mail.ru

The article deals with the problems of including regional economy in global value chains on the base of government stimulation of innovation development. Global value chains play the significant role in the modern world economy but the Russian economy is included in the organization of production across national boundaries on disadvantageous terms, as a supplier of raw materials. There is a conclusion about necessity for improving the international specialization of the Russian economy by being included in the global production network at the Research & Development stage like the developer of innovations. In order to reach this goal the article suggests a new approach for choosing appropriate government regulation objects and innovation production support instruments. The authors propose a new typology of regional economy sectors as the government regulation objects. There are two criteria used to determine the type of a regional economy sector: the first one is the level of production localization (whether or not regional product is the part of a national, regional or global production network), the second criteria is the type of a target market for this product (region, macroregion, national economy, Eurasian Economic Union, CIS states and non-CIS states). According to the type of regional economy sector government could apply one of the varieties of innovation production support policies. The article determines the principals of interactions between government bodies, scientific-research organizations and business during the implementation of the innovation production projects. These principles could be used for choosing instruments of innovation production government support.

Keywords: value chain, global production network, regional economy, government support of innovation production, object of the government support.

Введение. Ключевой проблемой новейшей социально-экономической политики России стала необходимость поиска новой модели экономического роста, отличной от доминировавшей в течение долгого времени «рентной» модели, основу которой составлял постоянно возрастающий приток нефтегазовой ренты [1]. Существенное снижение мировых цен на сырьевые товары привело к ухудшению условий торговли для России: двукратное падение цены на нефть и другие энергоресурсы, составляющие основные статьи российского экспорта, сопровождалось повышением цен на импортные комплектующие и оборудование, от которого российская экономика сильно зависит [2]. Болезненными для отечественной экономики оказались и введенные США и странами ЕС санкции в финансовой сфере, суть которых заключалась в ограничении доступа к международным рынкам капиталов для российских банков и государственных корпораций. Однако большинство экспертов сходятся во мнении, что текущее состояние российской экономики хоть и является следствием действия глобальных процессов и «внешних шоков», в значительной степени обусловлено специфическими институциональными проблемами России. Глобальный системный кризис и экономические санкции фактически обострили проблему поиска новой модели экономического роста для России, именно поэтому в центре внимания отечественных экономистов – долговременные макроэкономические процессы, вызвавшие стагнацию экономики, и вопросы структурных преобразований [3; 4].

Глобальные цепочки создания стоимости и глобальные производственные сети: возможности для роста российской экономики. Политика пассивной адаптации российской экономики к обрушению нефтяных цен и действию других «внешних шоков» не способна обеспечить не только рост экономики, но и ее стабилизацию в долгосрочном периоде. Для восстановления экономического роста и развития необходимо построение модели, позволяющей улучшить международную производственную специализацию России в направлении повышения доли инновационной продукции, стимулирующей отечественные компании участвовать в глобальных цепочках создания стоимости на более выгодных условиях. Так, документ «Стратегия 2020: новая модель роста – новая социальная политика» напрямую связывает вопросы формирования новой модели российской экономики и интеграцию отечественных компаний в цепочки международной кооперации, позволяющую реализовать уже имеющиеся конкурентные преимущества и сформировать будущие конкурентные компетенции [5].

Разработанная М. Портером концепция «цепочки создания стоимости», «цепочки ценности» (value chain) акцентирует внимание на взаимосвязи процессов создания, распределения и потребления конкретного продукта и услуги [6]. Понятие глобальной производственной сети (global production network), введенное в экономическую литературу уже после появления концепции М. Портера, привнесло в эту концепцию международное измерение [7]. В рамках глобальной производственной сети процессы, формирующие глобальную цепочку создания стоимости, распределены между территориями двух и более государств, охватывая все группы участников и отношения между ними.

В современной мировой экономике все больше экономических процессов выстраивается именно вокруг глобальных и региональных (международная сеть, все узлы которой расположены на территории одного экономического объединения стран) производственных сетей, вокруг создания цепочек стоимости на межстрановом уровне [8]. Акцент сделан на достижении синергетического эффекта объединения различных видов деятельности, начиная с НИОКР, заканчивая продвижением продукции на рынок и послепродажным обслуживанием. Компании превращаются из обособленных автономных субъектов, располагающих основными и вспомогательными производствами, складами, службами снабжения и сбыта, осуществляющих внешние транзакции на основе разовых эквивалентно-стоимостных контрактов, в звенья глобальной сети поставок и создания стоимости производственных кластеров. Управление цепочками поставок изменяет маркетинг взаимоотношений: переход от жестко интегрированных иерархических структур к горизонтальному сотрудничеству участников сети увеличивает сложность и многообразие хозяйственных связей, свободу выбора инноваций [9].

В течение последних двух десятилетий российская экономика была встроена в глобальные цепочки создания стоимости, в основном в качестве поставщика сырья. Несмотря на определенные сдвиги в структуре российского экспорта в период с 2014 по 2016 гг., а именно, увеличение доли сельскохозяйственных товаров и снижение доли минеральных продуктов и топливно-энергетических товаров, основой российского экспорта по-прежнему остается экспорт углеводородов. Помимо этого, распределение создаваемой добавленной стоимости в рамках участия России в глобальных производственных сетях часто оказывается не в пользу отечественной экономики: страны, контролирующие глобальные цепочки создания стоимости, извлекая интеллектуальную ренту, концентрируют на своей территории звенья цепи, связанные с высокой добавленной стоимостью (НИОКР, маркетинг). Характерным примером является организация на территории России «отверточной» сборки иностранных марок автомобилей (европейских, японских южнокорейских): благодаря трансфертному ценообразованию основные прибыли уходят в экономику зарубежных стран, транснациональным корпорациям, контролирующим глобальные производственные сети [10].

Вместе с тем, для многих развивающихся стран, например, Китая, Индии, Вьетнама, Малайзии, которые начиная с 1990-х годов относятся к числу основных бенефициаров глобальных процессов фрагментации производства и торговли промежуточными товарами и услугами, встраивание в глобальные производственные сети из альтернативы созданию собственных производств и технологий превратилось в один из способов получения передовых технологий [11]. Наиболее успешный опыт в этом отношении у Китая, который увязывает процессы размещения

на собственной территории производственных площадок транснациональных корпораций с передачей прав на интеллектуальную собственность. Именно благодаря реализации указанной государственной политики преуспели и получили широкую известность такие телекоммуникационные гиганты из Китая, как компании Huawei и Lenovo.

Чтобы более полно задействовать возможности участия в глобальных цепочках создания стоимости, избежать дальнейшей консервации сырьевой специализации за счет простой переориентации товарных потоков с Запада на Восток, российская экономика нуждается в структурных реформах. Цель данных реформ – накопление и развитие человеческого капитала, разработка новых технологий, создание условий для инвестиций и выпуска инновационной, особенно высокотехнологичной продукции, так как основную долю добавленной стоимости в глобальных цепочках создания стоимости получают именно страны – поставщики новых технологий, продуктов и услуг.

Включение региональных инновационных производств в глобальные цепочки создания стоимости: вопросы государственного регулирования. В условиях нарастания региональных диспропорций в экономическом и социальном развитии России, неоднородности уровня развития транспортной, производственной и социальной инфраструктуры на территории отдельных российских регионов, территориальное измерение указанной задачи приобретает особую актуальность. Современная экономическая политика развитых стран отдает предпочтение территориальному подходу в инновационной сфере, набор компетенций и меры государственной поддержки дифференцированы по территориям, что позволяет оперативно реагировать на тенденции изменения рынка [12]. В России до последнего времени проводилась выравнивающая региональная политика без учета инновационного потенциала отдельных территорий, выявления и вовлечения в реализацию проектов основных заинтересованных лиц, выбора приоритетов и соответствующего набора инструментов государственной поддержки. Несмотря на то, что в стране созданы институты развития (ОАО «Роснано», ОАО «РВК», региональные венчурные фонды), в регионах формируется инновационная инфраструктура (центры трансферта, технологий, инжиниринговые центры и т. д.), последние несколько лет активно используются нововведения, связанные с введением особых правовых режимов осуществления предпринимательской деятельности в границах локальных территориальных образований (особые экономические зоны, территории опережающего развития, инновационные территориальные кластеры), эксперты указывают на отсутствие взаимодействия между институтами развития, созданной инфраструктурой и региональным бизнесом [12]. Реальных прорывов в социально-экономическом оживлении регионов, особенно на базе развития инновационного предпринимательства, не так много [13].

На наш взгляд, для решения задачи государственного стимулирования инновационного развития на основе включения региональных экономик в глобальные производственные сети, участия в международном разделении труда на более выгодных условиях, необходим иной подход к выбору объектов государственной региональной экономической политики и соответствующих характеру данных объектов инструментов стимулирования инновационного предпринимательства. В качестве объектов государственной региональной экономической политики предлагаем рассматривать отдельные сегменты/секторы региональной экономики, разграничение которых будет осуществляться исходя из двух критериев (рис. 1).

Одним из указанных критериев является уровень локализации процесса производства продукта (услуга), т. е. фактически уровень «включенности» продукта (услуги) (выпуск или оказание которых осуществляется/планируется региональными компаниями) в национальные, региональные (в данном случае территория Евразийского экономического союза) и глобальные производственные сети. Под национальной цепочкой создания стоимости понимается концентрация всей совокупности процессов создания, распределения и потребления продукта (услуги) в пределах национальной экономики, что соответствует концепции М. Портера без учета международного измерения. Соответственно, все узлы национальной производственной сети сконцентрированы в пределах одной страны.

В качестве второго критерия выступает уровень локализации рынка потребления продукта (услуги). В предлагаемой типологии выделены несколько типов рынков: регион (территория субъекта Российской Федерации), макрорегион (федеральный округ), национальные границы, пространство Евразийского экономического союза (ЕАЭС), СНГ и дальнее зарубежье.

Обоснование выбора первого критерия фактически представлено выше. Многие производственные процессы благодаря таким факторам, как технический прогресс, развитие транспортной инфраструктуры и удешевление перевозок, либерализация торговли, дробятся на отдельные операции, которые осуществляются как в разных регионах одной страны, так и разных странах. В современной экономике предметом торговли все чаще выступают не товары и услуги как таковые, а доли в добавленной стоимости, формирующие стоимость конечного продукта.

Учет специфики рынка, для которого предназначен региональный продукт (услуга), необходим для оценки потенциальной готовности рынка принять данный продукт, что особенно актуально для инновационной, в том числе высокотехнологичной, продукции. Российская Федерация является средоточием территорий, отличающихся уровнем социально-экономического развития, инновационной активности и степени включенности в систему международной кооперации. Наряду с финансово-экономическими и интеллектуальными центрами страны (города федерального значения Москва и Санкт-Петербург) и прилегающими к ним территориями, на которые приходится подавляющее большинство иностранных инвестиций, а также группой высокоразвитых регионов с преобладающей сырьевой экспортной ориентацией (например, Тюменская область), многие российские регионы ориентированы практически исключительно

на внутренний рынок, имея весьма ограниченный спектр внешнеэкономических связей. Соответственно, возможности и готовность участия различных российских регионов в программах импортозамещения, в проектах созданиях экспортно ориентированных производств, т. е. возможности выхода на различные типы рынков, существенно отличаются.

Рынок ЕАЭС отдельно выделен в связи с особым значением для России интеграционных процессов на евразийском пространстве. В настоящее время Евразийский экономический союз может рассматриваться как единственное сравнительно работоспособное, имеющее перспективы роста межстрановое объединение на всем постсоветском пространстве. СНГ так и не смог состояться в качестве полноценного инструмента постсоветской интеграции. Также ЕАЭС является одним из самых быстроразвивающихся интеграционных объединений в мире: в 2010 г. был создан Таможенный союз России, Беларуси и Казахстана (ТС), в 2012 г. началось формирование единого экономического пространства (ЕЭП) трех стран, а в 2015 г. – Евразийского экономического союза, союз пополнился Арменией и Кыргызстаном [14].

В рассматриваемом нами контексте производственные процессы по созданию инновационной продукции (услуг) для определенных типов рынков, а также процессы распределения и потребления данного продукта (услуги) могут рассматриваться в качестве объектов управления для органов государственной власти, как федеральных, так и региональных, призванных оказывать стимулирующее воздействие на данные объекты для достижения целей региональной экономической политики (рис. 2). В рамках курса на инновационное развитие экономики страны и регионов в качестве такой цели будет выступать стимулирование инновационного развития на основе включения региональных экономик в глобальные производственные сети, а также региональные производственные сети, в качестве которых в предлагаемой типологии рассматривается региональная сеть, все узлы которой располагаются на территории стран – членов ЕАЭС. Безусловно, что с точки зрения целей достижения сбалансированного территориального развития хозяйства страны встраивание регионального продукта (услуги) в национальные производственные сети, выстраивание национальных цепочек создания стоимости представляется не менее важной задачей, решению которой должно быть посвящено отдельное исследование.

Реализация политики государственной поддержки включения инновационных производств, уже существующих или планируемых к созданию на территории региона, в глобальные и региональные производственные сети требует изменения подходов к взаимодействию между федеральными и региональными государственными структурами, с одной стороны, и между государством, научно-исследовательскими организациями и бизнес-сообществом – с другой. В ходе реализации проектов по выпуску инновационной продукции и подбору инструментов государственной поддержки указанное взаимодействие должно быть основано на следующих принципах:

1. Комплексное изучение потенциала региона, в том числе инновационного потенциала, сложившихся условий и предпосылок саморазвития территории (качество «человеческого капитала», потенциал создания новых знаний и технологий, потенциал внедрения новых технологий, интенсивность конкуренции и сложившихся кооперационных связей на уже существующих рынках, возможности появления новых продуктов и рынков).

В результате проведения данного анализа должна быть дана оценка перспектив локализации инновационных процессов на территории, возможностей включения выпускаемой региональными предприятиями продукции (услуг) в глобальные и региональные цепочки создания стоимости, с одной стороны, а также привлечения ведущих мировых игроков на территорию региона, с другой стороны, определены ключевые для региональной экономики инновационные производства, поддержка которых должна стать прерогативой региональной экономической политики государственных структур.

2. Определение основных «субъектов влияния» (stakeholder), которые будут непосредственно задействованы в реализации проектов организации производства инновационной продукции.

В качестве «субъектов влияния» могут выступать не только государственные властные структуры регионального и федерального уровня, научно-исследовательские организации, малый и средний бизнес, часто значимые рычаги воздействия на развитие региональных хозяйственных комплексов находятся в руках у вертикально интегрированных корпораций. В частности, российский крупный бизнес непосредственно оказывает влияние на величину региональной компоненты в произведенной добавленной стоимости, состояние локальных рынков труда и обладает значительными инвестиционными ресурсами.

Принимая во внимание, что речь идет о вхождении региона в систему мирохозяйственных связей, без активного международного взаимодействия реализация инвестиционных проектов невозможна. Включение в глобальные производственные цепочки создания стоимости на первоначальных этапах связано с процессами трансферта технологий, импорта оборудования и привлечения иностранных специалистов, поэтому зарубежные компании будут выступать в качестве одного из важнейших stakeholder – партнеров проектов организации инновационных производств.

3. Интенсификация горизонтальных и вертикальных связей в рамках реализуемых проектов: стимулирование сетевых взаимодействий между компаниями или группами компаний в рамках одного региона, макрорегиона (федеральный округ), страны в целом, между бизнесом, институтами развития и научно-исследовательскими организациями, между государственными структурами различного уровня и разных субъектов Федерации; интенсификация международного сотрудничества с компаниями, входящими в состав транснациональных корпораций, под контролем которых находятся практически все глобальные цепочки создания стоимости (по данным ЮНКТАД 80 % добавленной стоимости в мире формируется в рамках производственно-торговых цепочек, координируемых транснациональными корпорациями [11]).

Локализация рынка

Локальный рынок → Мировой рынок

Локализация производства

Локальный продукт ↓ Глобальная производственная сеть

Тип рынка / Тип товара	*Регион*	*Макрорегион (федеральный округ)*	*Национальные границы*	*Пространство – ЕАЭС*	*Дальнее зарубежье и СНГ*
Локальный продукт (услуга) Производство локализовано в регионе	Локальное производство для локального рынка	Локальное производство для рынков соседних регионов	Локальное производство для общероссийского рынка	Локальное производство для рынка стран – членов ЕАЭС	Локальное производство для рынков стран, представляющих дальнее зарубежье и СНГ
Продукт (услуга) – часть национальной производственной сети		Производство полуфабрикатов/ комплектующих для российских компаний, расположенных на территории соседних регионов	Производство полуфабрикатов/ комплектующих для российских компаний, расположенных на территории РФ		
Продукт (услуга) – часть региональной (регион – ЕАЭС) производственной сети				Производство полуфабрикатов/ комплектующих для российских компаний, расположенных на территории стран – членов ЕАЭС	
Продукт (услуга) – часть глобальной производственной сети					Производство полуфабрикатов/ комплектующих для российских компаний, расположенных на территории стран Дальнего зарубежья и СНГ

Рис.1. Типология секторов региональной экономики как объектов государственного регулирования

Fig.1. Typology of regional economy sectors as the government regulation objects

№	*Направление политики государственной поддержки инновационных производств*
1	Поддержка производства товаров / оказание услуг на территории региона для локального рынка (локальное производство для локального рынка)
2	Поддержка локального производства продукта (полуфабрикатов, комплектующих) / услуг, поставляемых компаниям, расположенным на территории соседних регионов (территория федерального округа)
3	Поддержка локального производства продукта (полуфабрикатов, комплектующих) / услуг, являющихся частью национальной производственной сети
4	Поддержка локального производства продукта (полуфабрикатов, комплектующих) / услуг, являющихся частью региональной (регион – ЕАЭС) производственной сети
5	Поддержка локального производства продукта (полуфабрикатов, комплектующих) / услуг, являющихся частью глобальной производственной сети
6	Содействие созданию на территории региона производств зарубежных компаний (ТНК) / регистрация офисов зарубежных компаний в регионе
7	Содействие созданию на территории региона производств компаний стран – членов ЕАЭС / регистрация офисов компаний, представляющих страны – члены ЕАЭС в регионе
8	Содействие созданию на территории региона производств российских компаний / регистрация офисов российских компаний в регионе
9	Содействие созданию на территории региона производств российских компаний, зарегистрированных на территории соседних регионов (территория федерального округа) / регистрация офисов данных компаний в регионе

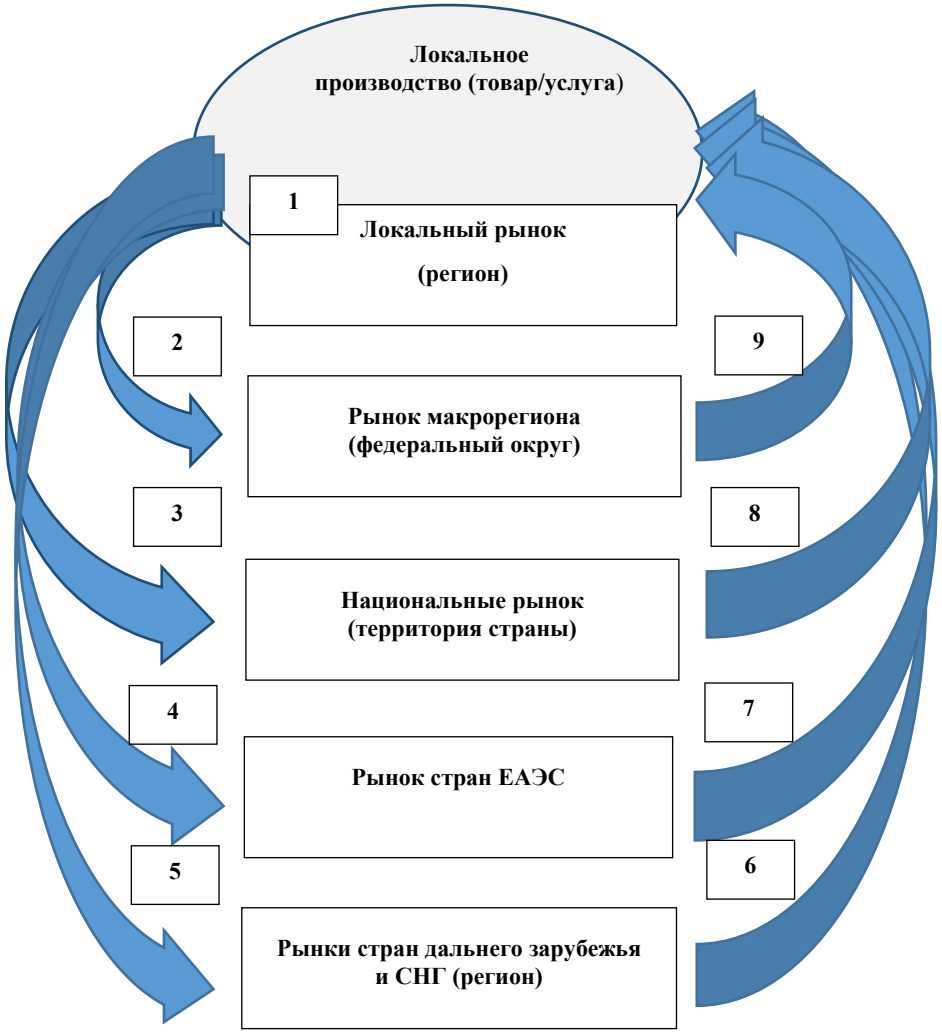


Рис. 2. Направления политики государственной поддержки инновационных производств

Fig. 2. Innovation production government support policies

Необходимость стимулирования сетевых взаимодействий обусловлена тем, что современная экономика, основанная на инновациях, становится сетевой, а общество превращается в систему сетевых структур. Интеграция конкуренции и сотрудничества связана с умением найти отличную от остальных нишу, выявлять потребность в новых продуктах и организационно-технологических комбинациях производственных факторов.

В этой связи интересен опыт США по внедрению практики «инновационного брокерства» и созданию специализированных организаций «брокеров инноваций», которые, выступая по отношению к компании в роли внешней организации, осуществляют функцию посредников при взаимодействии компании и ее потенциальных партнеров по осуществлению инновационной деятельности [15]. «Брокеры инноваций» фактически являются связующим звеном формируемой при поддержке государства инновационной инфраструктуры и выступают в качестве центра, объединяющего сети предприятий, инвестиционный капитал и людей. При этом поддержку могут получить не только стартапы, но и перспективные идеи с высоким потенциалом коммерциализации, способные улучшить уже существующий бизнес, что особенно важно для отечественных компаний, которые могут рассчитывать на вхождение в глобальные производственные сети за счет возможности обеспечить более высокую операционную эффективность при выполнении сходных видов деятельности.

Для выхода малых и средних инновационных предприятий, научно-исследовательских организаций, отдельных разработчиков на национальный и международный уровень «брокеры инноваций» предоставляют услуги по организации «технологических брокерских событий», которые представляют собой предварительно организованные встречи между инновационными компаниями или разработчиками, предлагающими новые технологии, и теми компаниями, которые ведут поиск новых технологий и хотят приобрести их для дальнейшей эксплуатации или инвестирования [16].

Использование зарубежного опыта в сфере организации технологического брокерства, государственная поддержка организаций «брокеров инноваций» может помочь в решении задачи интеграции региональных компаний – разработчиков инноваций в зарубежные сети трансфера технологий, международные научно-исследовательские консорциумы и, таким образом, содействовать включению региональной экономики в глобальные производственные сети. При этом российские компании получат возможность контроля над глобальными цепочками создания стоимости уже на начальном этапе R&D (research&development – этапе исследований и разработок).

Заключение. Современный уровень развития мирохозяйственных связей, а также выгоды, получаемые развитыми экономиками в рамках участия в глобальных цепочках создания стоимости, подталкивают Россию к ускоренному изменению международной производственной специализации на базе использования накопленного в регионах инновационного потенциала. Усиление процессов глобализации приводит к тому, что достижение высоких показателей эффективности с опорой только на ресурсы национальной экономики для многих отраслей становится трудновыполнимой задачей. Однако при всей привлекательности участия в международном разделении труда необходимо, чтобы включение региональных экономик в глобальные цепочки создания стоимости приносило максимальный синергетический эффект, а это возможно при условии развития тех секторов экономики, которые обладают конкурентными преимуществами на региональном и мировом уровнях, за которыми будущее, а будущее – за инновациями. Задача государственной политики – идентификация и поддержка таких секторов.

Библиографические ссылки

1. Мау В. Антикризисные меры или структурные реформы: экономическая политика России в 2015 году // Вопросы экономики. 2016. № 2. С. 5–33.

2. Оболенский В. Внешняя торговля России: барометр предсказывает бурю // Мировая экономика и международные отношения. 2016. Т. 60, № 2. С. 15–25.

3. Акиндинова Н., Кузьминов Я., Ясин Е. Экономика России: перед долгим переходом // Вопросы экономики. 2016. № 6. С. 5–35.

4. Маневич В. Долговременные макроэкономические процессы и условия роста российской экономики // Вопросы экономики. 2017. № 1. С. 40–63.

5. Стратегия 2020: новая модель роста – новая социальная политика [Электронный ресурс]. URL: http://im.kommersant.ru/content/pics/doc/doc1753934.pdf (дата обращения: 20.11.2017).

6. Porter M. E. Competition in Global Industries: A Conceptual Framework // Competition in Global Industries. Boston : Harvard Business School Press, 1986. Pp. 15–60.

7. Ernest D., Kim L. Global Production Networks, Knowledge Diffusion, and Local Capability Formation // Research Policy. 2002. Vol. 31, iss. 8–9. Pp. 1417–1429. DOI: 10.1016/S0048-7333(02)00072-0.

8. Мазитова М., Демина Я. Международные производственные сети: роль стран Восточной Азии // Пространственная экономика. 2017. № 1. С. 71–98. DOI: 10.14530/se.2017.1.071-098.

9. Бляхман Л. С. Глобальные, региональные и национальные тенденции развития экономики России в XXI веке: избранные труды / Санкт-Петербургский гос. ун-т. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2016. 671 с.

10. Дементьев В., Устюжин Е. Включение отечественной экономики в глобальные цепочки создания стоимости: созидательный потенциал и риски // Российский экономический журнал. 2016. № 2. С. 19–34.

11. Кукушкина Ю. Глобальные цепочки создания стоимости и корпоративные интересы транснациональных корпораций // Современная конкуренция. 2016. Т. 10, № 2 (56). С. 107–117.

12. Земцов С., Баринова В. Смена парадигмы региональной инновационной политики в России:

от выравнивания к «умной специализации» // Вопросы экономики. 2016. № 10. С. 65–81.

13. Щвецов А. «Точки роста» или «Черные дыры»? (К вопросу об эффективности применения «зональных» инструментов госстимулирования оживления экономической динамики территорий) // Российский экономический журнал. 2016. № 3. С. 40–61.

14. Головнин М., Захаров А., Ушкалова Д. Экономическая интеграция: уроки для постсоветского пространства // Мировая экономика и международные отношения. 2016. Т. 60, № 4. С. 61–69.

15. Инфраструктура поддержки деятельности на разных этапах инновационного процесса: выявление «узких мест» в текущей российской практике и предложения по ее совершенствованию / В. А. Баринова [и др.]. М. : Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 2014. 83 с.

16. Катешова М., Квашин А. Как организовать технологическое брокерское событие: встречи инвесторов/партнеров с авторами/владельцами инновационных технологий // Практическое руководство для центров коммерциализации технологий : метод. материалы / Проект EuroAid «Наука и коммерциализация технологий». 2006. 56 с.

References

1. Mau V. [Anti-crisis measures or structural reforms: Russia's economic policy in 2015]. *Voprosy Ekonomiki*. 2016, Vol. 2, P. 5–33 (In Russ.).

2. Obolenskii V. [Foreign trade of Russia: barometer foretells storm]. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya*. 2016, Vol. 60, No. 2, P. 15–25 (In Russ.).

3. Akidinova N., Kuzminov Ya., Yasin E. [Russia's economy: Before the long transition]. *Voprosy Ekonomiki*. 2016, Vol. 6, P. 5–35 (In Russ.).

4. Manevich V. [Long-term macroeconomic processes and conditions for economic growth in Russia]. *Voprosy Ekonomiki*. 2017, Vol. 1, P. 40–63 (In Russ.).

5. Strategiya 2020: novaya model' rosta–novaya sotsial'naya politika. (In Russ.). Available at: http://im.kommersant.ru/content/pics/doc/doc1753934.pdf (accessed: 20.11.2017).

6. Porter M. E. Competition in Global Industries: A Conceptual Framework. *Competition in Global Industries*. Boston, Harvard Business School Press. 1986, P. 15–60.

7. Ernest D., Kim L. Global Production Networks, Knowledge Diffusion, and Local Capability Formation. *Research Policy*. 2002, Vol. 31, Iss. 8–9, P. 1417–1429. DOI: 10.1016/S0048-7333(02)00072-0.

8. Mazitova M., Dyomina Ya. [International Production Networks: The Role of East Asia]. *Prostranstvennaya ekonomika*. 2017, Vol. 1, P. 71–98 (In Russ.). DOI: 10.14530/se.2017.1.071-098.

9. Bljahman L. S. *Global'nye, regional'nye i natsional'nye tendentsii razvitija ekonomiki Rossii v XXI veke: izbrannye trudy* [Global, regional and national trends of Russian economy development in the XXI century: selectas]. Saint Petersburg, Saint Petersburg University Publ., 2016, 671 p.

10. Dement'ev V., Ustjuzhin E. [Including national economy in global value chains: creative potential and risks]. *Rossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal*. 2016, Vol. 2, P. 19–34 (In Russ.).

11. Kukushkina Y. [Global value chains and corporate interests of multinational corporations]. *Sovremennaya konkurentsiya*. 2016, Vol. 10, No. 2 (56), P. 107–117 (In Russ.).

12. Zemtsov S., Barinova V. [The paradigm changing of regional innovation policy in Russia: From equalization to smart specialization]. *Voprosy Ekonomiki*. 2016, Vol. 10, P. 65–81 (In Russ.).

13. Shhvecov A. [Growing-points or Black holes? (To the question of effectiveness in applying "area-based" instruments of economic activity state support)]. *Rossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal*. 2016, Vol. 3, P. 40–61 (In Russ.).

14. Golovnin M., Zakharov F., Uschkalova D. [Economic integration: lessons for the post-soviet space]. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya*. 2016, Vol. 60, No. 4, P. 61–69 (In Russ.).

15. Barinova V. A., Eremkin V. A., Muhlisova A. P., Radnabazarova S. Zh., Ribalkin V. V., Shestakov V. A. *Infrastruktura podderzhki deyatel'nosti na raznykh etapakh innovatsionnogo protsessa: vyyavlenie "uzkikh mest" v tekushchey rossiyskoy praktike i predlozheniya po ee sovershenstvovaniy* [The infrastructure supporting the activity at different stages of the innovation process: identifying and overcoming bottlenecks regarding Russian specifics]. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education. The Russian Presidential Academy of the National Economy and Public Administration, 2014, 83 p. (In Russ.).

16. Kateshova M., Kvashin A. *Kak organizovat' tekhnologicheskoe brokerskoe sobytie: vstrechi investorov/partnerov s avtorami/vladel'tsami innovatsionnykh tekhnologiy* [How to organize technologic brokerage event: meetings between investors/partners with the authors/owners of innovation technologies]. Serial "How to Do Guides for the Centers of Commercialization". Project EuroAid "Science and commercialization of technologies", 2006. 56 p. (In Russ.).

© Ерыгин Ю. В., Волкова М. А., 2017

УДК 378

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 976–980

СОВРЕМЕННОЕ УПРАВЛЕНЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

О. Е. Подвербных[1*], В. М. Краев[2], А. И. Тихонов[2]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
[*]E-mail: podverbnykholga@mail.ru

Авиационно-космическая отрасль России переживает серьезные изменения. Недостаточное развитие управленческих компетенций не позволило создать в России эффективную модель отрасли. Основными проблемными трендами являются отсутствие опыта работы в условиях международной кооперации и глобальной конкуренции, недооценка значимости международной сертификации продукции, недооценка значимости компетенций в продажах и сервисе, отсутствие компетенций по управлению цепочкой поставок и развитию поставщиков, выстраиванию новых кооперационных связей на долгосрочной и партнерской основе, неэффективное корпоративное управление в интегрированных структурах промышленности.

Представлен подход подготовки управленческих кадров для авиационно-космической отрасли с учетом современных условий и требований отрасли. Сформулированы основные требования к подготовке управленцев для отрасли: базовое профессиональное образование по профилю компании/предприятия, управленческое образование, дающее основы управления бизнес-процессами, научная ориентированность или даже уровень экспертных знаний на уровне кандидата наук, больший акцент на организационно-деятельностные игры, которые формируют динамичность и нестандартность бизнес-процесса.

Представлено современное видение процесса подготовки профессионального управленца для авиационно-космической отрасли. Первый этап – базовое техническое образование в одном из ведущих авиационно-космических вузов страны со степенью бакалавра. Второй этап – управленческое образование со степенью магистра. Третий этап – обучение в аспирантуре и защита диссертации по профилю предприятия. Причем круг научных интересов может быть сформирован еще на 2–3 курсе бакалавриата. Обязательным требованием к образовательному процессу на втором этапе является форма обучения в виде деловых управленческих игр. Данную концепцию предложено реализовать в виде программы подготовки управленческих кадров отрасли на базе ведущих авиационно-космических вузов страны, имеющих в своем составе и полный спектр технических специальностей, и отделение подготовки менеджмента. Данный подход является универсальным и может быть использован для подготовки управленческих кадров других отраслей промышленности.

Ключевые слова: авиационно-космическая промышленность, подготовка управленческих кадров.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 976–980

UP-TO-DATE ENGINEERING MANAGEMENT EDUCATION

O. E. Podverbnykh[1*], V. M. Kraev[2], A. I. Tikhonov[2]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation
[*]E-mail: podverbnykholga@mail.ru

Aviation and aerospace industry is going through critical changes. Lack of administrative competences does not allow us to develop the industry efficient model. The main challenging trends are lack of work experience under the conditions of international cooperation and global competition, underestimation of significance of international accreditation and the importance of competences in selling and service, lack of competences in supply chain management and development of suppliers, establishing new cooperation ties based on long-term and partnership grounds, inefficient corporate management in the integrated industrial structures.

The research presents an approach to train professional managers for aviation-aerospace industry taking into account current tendencies and industry demands. The researchers have formulated the main requirements to train professional managers for the industry: the basic professional education with specialization in the sphere where a company/enterprise functions, specialization in management providing the grounds for business process management,

scientific focus or even expert knowledge at the level of a candidate of science, the great focus on organization pragmatist games, forming a business process impact and distinction.

The research demonstrates a current vision of the training process for a professional manager for aviation and aerospace industry. The first stage is a basic education in one of the leading aerospace university in the country resulting in a bachelor degree. The second stage is a master degree in management. The third stage is post-graduate education and dissertation defence in the field of an enterprise specialization. Moreover, the sphere of scientific interests can be defined at the 2-nd or 3-d years of a bachelor programme. The compulsory requirement to the educational process at the second stage is a training methodology in a form of organization pragmatist games. The concept is proposed to realize as a training programme for the industry management staff based on the leading aerospace universities of the country commanding a complete spectrum of technical specializations and a department responsible for managers training. The approach is universal and can be applied to train professional management for different industries.

Keywords: aerospace industry, training professional managers.

Введение. Авиационно-космическая отрасль России переживает серьезные изменения. В рамках Стратегии развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года [1], проекта долгосрочной программы развития Объединенной авиастроительной корпорации до 2025 года [2], Стратегии развития космической деятельности России до 2030 года [3] перед руководством отрасли поставлены глобальные задачи на ближайшие годы и на дальнейшую перспективу.

Целями государственных стратегий является формирование экономически устойчивой, глобально конкурентоспособной отрасли, встроенной в мировой рынок и международное разделение труда, а также способной обеспечить всю научно-производственную цепочку для достижения мирового уровня российской авиации и космонавтики.

Предыдущие стратегии были чрезмерно амбициозными и выполнены не в полном объеме. За частичным выполнением стратегий прослеживается целый ряд причин. Организации отрасли переоценили свои финансовые и организационные возможности, равно как и спрос на свою продукцию. Отсутствие опыта работы в условиях международной кооперации и глобальной конкуренции, недооценка значимости международной сертификации продукции, недооценка значимости компетенций в продажах и сервисе стали непреодолимым препятствием для успешного выхода отечественных организаций на внешний рынок. Отсутствие компетенций по управлению цепочкой поставок и развитию поставщиков, выстраиванию новых кооперационных связей на долгосрочной и партнерской основе не позволило создать в России эффективную модель отрасли. Устранение возникших в ходе реализации стратегий сложностей сдерживалось неэффективным корпоративным управлением в интегрированных структурах промышленности.

Повышение конкурентоспособности отечественных предприятий отрасли должно быть постоянно действующим инновационным процессом. А поскольку инновационный процесс не является стабильным и выводит из состояния равновесия любое производство, то необходимо создание механизма, обеспечивающего эффективность внутриорганизационного взаимодействия, т. е. предпосылкой конкурентоспособности отрасли является формирование и развитие потенциала организаций и владение реальными инструментами превращения потенциала в фактор действительной конкуренции [4].

Перспективы стратегических корпоративных приоритетов в сфере обучения. В рамках современных стратегий государство скорректирует программы обучения, создав условия для обучения с применением новых материалов, нового промышленного оборудования, современных информационных систем проектирования и управления производством. Будут скорректированы программы подготовки и повышения квалификации преподавательского состава средних и высших учебных заведений с учетом прогрессивных методов проектирования, производства, испытаний, сертификации, продаж и маркетинга, управления цепочкой поставок, управления качеством, управления интеллектуальной собственностью, поддержки жизненного цикла авиационно-космической техники и управления проектами.

Вообще, проблематика подготовки управленцев современного уровня в последнее время обсуждается в профессиональных кругах особенно активно. Считается, что концепция инновационного развития экономики страны требует от образования активных действий в целях интеграции инженерных, экономических и управленческих знаний [5]. Более того, изменения в отраслях промышленности происходят с непредсказуемой быстротой, поэтому сфера образования должна реагировать еще быстрее. В текущий момент требуются профессиональные менеджеры, подготовленные для работы в конкретной отрасли. В качестве решения предлагается создавать альянсы между техническими и управленческими вузами с целью создания нового направления – инженерно-управленческого образования, сочетающего в себе равноценные циклы дисциплин по инженерной, управленческой и экономической подготовке, а также блоки социально-гуманитарных, математических и естественно-научных дисциплин.

Не так давно был разработан проект «Форсайт компетенций 2030» [6], целью которого является формирование списка компетенций, необходимых для различных областей занятости. Среди выводов следует отметить появление в ближайшие 10 лет так называемых гибридных типов работников, в том числе инженеров-управленцев и инженеров-предпринимателей, обладающих высоким уровнем системного мышления, знанием технологических процессов трех и более

отраслей, ориентированных изначально на глобальный рынок с четким пониманием развития отрасли и страны в мировом контексте. Под гибридным типом понимаются также инженеры-рабочие с хорошим знанием программирования, технических процессов в разных отраслях, владеющие техническим английским языком, способные принимать решения в нестандартных ситуациях.

Таким образом, перед вузами, отвечающими за подготовку кадров авиационно-космической отрасли, поставлены серьезные задачи. Вузы должны выпускать не только инженеров, конструкторов, технологов, испытателей, но и управленческий состав для отрасли. Причем эти профессионалы должны быть с первых курсов обучения не просто ознакомлены со спецификой авиационно-космической отрасли, но и должны получить полноценное авиационно-космическое образование. То есть выпускник-управленец должен уметь решать не только задачи по управлению бизнес-процессом предприятия, но и понимать все технические особенности отрасли [7; 8].

Проблематика организации и управления – оргуправленческая деятельность – являлась важной для экономики в любые времена. Вообще, подготовкой управленцев (менеджеров) занимались еще с конца XIX века. Следует рассмотреть два основных подхода в подготовке менеджеров. Первый из них предполагает наличие у менеджера хорошего управленческого образования без специфики его приложения, т. е. в отрыве от конкретной области деятельности компании. Второй подход предполагает, что менеджер должен обладать знаниями не только управленца, но и специалиста конкретной области, а в идеале – быть еще и ученым [9–13].

Слабые стороны первого подхода заключаются в том, что молодой управленец, обладая большим объемом общих знаний, может совершить большое количество ошибок, так как обладает широкими полномочиями как менеджер, но слабыми знаниями как специалист в конкретной области. Для компенсации пробелов ему потребуется окружить себя советниками и экспертами по области деятельности компании. Однако и такой подход содержит изъяны, так как принятие управленческих решений должно быть зачастую быстрым, без длительных обсуждений с экспертами и сочетать в себе единственную позицию одновременно управленца и профессионала.

Если мы говорим о втором подходе, то обязательно нужно вспомнить Георгия Петровича Щедровицкого, выдающегося советского и российского философа и методолога, создателя системомыследеятельностной методологии, основателя Московского методологического кружка. Для воплощения своих философско-методологических идей он предложил новую форму организации коллективных мышления и деятельности – организационно-деятельностные игры, объединяющие в себе свойства учебно-деловых игр и интеллектуального методологического дискурса. Г. П. Щедровицким была выработана собственная концепция смысла и цели управленческой деятельности в жизни общества. Был введен даже собственный термин – ОРУ, являющийся аббревиатурой от трех составляющих, которые формируют основные черты: организация, руководство, управление [14]. Управленческая деятельность является деятельностью над деятельностями, т. е. управленец должен сам обладать специализированными знаниями в управляемом им процессе. Например, если речь идет об управлении производством, то менеджер должен иметь базовое инженерное образование по профилю предприятия. В дополнение следует отметить, что успех компании зависит напрямую от степени внедрения инноваций, а значит, управленец должен быть близок к науке и понимать, что без современных научных разработок бизнес-процесс может стать попросту неконкурентным. Это первое. Второй тезис заключается в том, что в управленческой деятельности отсутствуют готовые конкретные решения. Есть лишь возможность их создавать на базе собственных знаний и способности размышлять и анализировать. Иначе говоря, система подготовки управленцев должна быть направлена не на формирование у них готовых к применению на практике знаний, а на развитие у управленцев способности к самостоятельной постановке и решению управленческих задач, т. е. к самостоятельному выбору, созданию и употреблению самих знаний. Третий тезис сформирован относительно временной шкалы бизнес-процесса. Традиционно управленческую деятельность представляют как усилия на поддержание стабильного бизнес-процесса. Однако на практике управленческая деятельность таковым стабильным процессом не является. Наоборот, в управленческой сфере нет сбалансированных механизмов и стационарных бизнес-процессов. Задача управленца, руководителя, менеджера состоит в том, чтобы сохранять определенный баланс в бизнес-процессе за счет своей управленческой деятельности. Согласитесь, такой подход в корне отличается от первого.

Требования к подготовке руководителей в авиационно-космическом комплексе. Сформулируем основные требования к подготовке управленцев:

– базовое профессиональное образование по профилю компании/предприятия;

– управленческое образование, дающее основы управления бизнес-процессами;

– научная ориентированность или даже уровень экспертных знаний на уровне кандидата наук;

– больший акцент на организационно-деятельностные игры, которые формируют динамичность и нестандартность бизнес-процесса.

Данный подход является универсальным и применим для компаний/предприятий любой отрасли. Более того, чем у́же специализация предприятия, тем у́же должна быть специализация управленца. Это в полной мере относится к авиационно-космической отрасли, а именно, такой менеджер в первую очередь должен обладать базовым техническим образованием в авиа- или ракетостроении. Такой специалист как «технарь» должен уметь проектировать, конструировать и работать с технической документацией, проводить прикладные исследования, оптимизировать техническое решение. Как управленец он должен уметь самостоятельно формировать цели и задачи, планировать бизнес-процесс, проводить анализ деятельности

предприятия. По своим коммуникативным компетенциям он должен уметь работать в команде, мотивированно защищать свою точку зрения и в то же время находить компромиссы для достижения общего результата.

Заключение. В современной авиационно-космической отрасли требуются специалисты, владеющие основными технологиями и научными методами, нацеленные на постоянное развитие и формирование эффективных коммуникаций, понимающие экономическую основу бизнес-процессов предприятия и ориентирующиеся в моделях управления [15].

Опираясь на сформулированные выше требования, составим современное видение процесса подготовки профессионального управленца для авиационно-космической отрасли.

Первый этап – базовое техническое образование в одном из ведущих авиационно-космических вузов страны со степенью бакалавра.

Второй этап – управленческое образование со степенью магистра.

Третий этап – обучение в аспирантуре и защита диссертации по профилю предприятия. Причем круг научных интересов может быть сформирован еще на 2–3 курсе бакалавриата.

Обязательным требованием к образовательному процессу на втором этапе является форма обучения в виде деловых управленческих игр.

Поскольку выпускники-управленцы требуются на ведущих предприятиях, то и уровень их подготовки, как инженеров, так и управленцев, должен быть максимально высоким, т. е. речь идет об уровне профессорско-преподавательского состава. В учебном процессе должны быть задействованы ведущие профессора вузов, находящиеся в тесном контакте с конструкторско-технологическими подразделениями предприятий. Те же требования остаются актуальными и для управленческой подготовки специалистов.

Каким образом объединить все три этапа в единое целое? Логичный вывод напрашивается сам собой: сформировать программу подготовки управленческих кадров отрасли на базе ведущих авиационно-космических вузов страны, имеющих в своем составе и полный спектр технических специальностей, и отделение подготовки менеджмента, и специалистов, владеющих современными методами деловой и коммуникативной подготовки.

Библиографические ссылки

1. Стратегия развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://minpromtorg.gov.ru/docs/ (дата обращения: 20.03.2017).

2. Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: https://www.roscosmos.ru/23380/ (дата обращения: 14.03.2017).

3. Проект долгосрочной программы развития ОАК до 2025 года [Электронный ресурс]. URL: http://uacrussia.ru/ru/press-center/news/news_646146 (дата обращения: 14.05.2017).

4. Тихонов А. И. Проблемы и предпосылки конкурентоспособности авиационного двигателестроения // Вестник университета (Государственный университет управления). 2014. № 14. С. 262–267.

5. Зеленцова Л. С., Воронцов В. Б. Инженерно-управленческое образование как национальный приоритет // Вестник университета (Государственный университет управления). 2013. № 12. С. 234–238.

6. Форсайт компетенций 2030 [Электронный ресурс]. URL: http://asi.ru/molprof/foresight/12264/ (дата обращения: 30.03.2017).

7. Краев В. М., Тихонов А. И. Риск-менеджмент в управлении кадрами // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2016. № 8-2 (21). С. 22–25.

8. Шумик Е. С. Современная система образования: возможности или препятствия для воспроизводства инженерно-технических и инженерно-управленческих кадров // Известия ДВФУ. Экономика и управление. 2014. № 2. С. 41–50.

9. Зеленцова Л. С. Импортозамещение. Образовательный аспект // Управленческие науки в современном мире. 2015. Т. II, № 1. С. 262–267.

10. Краев В. М., Тихонов А. И. Управленческий консалтинг в авиационно-космическом комплексе. М. : Доброе слово, 2016. 104 с.

11. Калачева Л. В. Повышение уровня кадрового потенциала горнопромышленного комплекса в условиях инновационной деятельности на основе альянса вузов и угольных компаний // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 11. С. 31–38.

12. Зеленцова Л. С., Воронцов В. Б. Перспективы развития инженерно-управленческого и отраслевого образования // Вестник университета (Государственный университет управления). 2013. № 12. С. 229–234.

13. Краев В. М., Тихонов А. И. Особенности кадровой работы на предприятиях оборонно-промышленного комплекса для повышения экономической безопасности // Идеи К. Э. Циолковского в инновациях науки и техники : материалы 51 Научных чтений памяти К. Э. Циолковского. 2016. С. 447–448.

14. Щедровицкий Г. П. Организация, руководство, управление. Курс лекций [Электронный ресурс] // Форматирование электрон. версии : Марат Садыков / sadykov.org / 8 февраля 2009 г.

15. Окунева Т. Г., Подвербных О. Е. Организационно-экономический подход в управлении подготовки инженерных кадров в системе высшего образования // Управление человеческими ресурсами – основа развития инновационной экономики : материалы VI Междунар. науч. конф. (21–23 марта 2015, г. Красноярск) / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. С. 191–194.

References

1. *Strategiya razvitiya aviatsionnoy promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Russian Federation Aviation Industry Development Strategy at 2030]. Available at: http://minpromtorg.gov.ru/docs/ (Accessed 20 March 2017).

2. *Strategiya razvitiya kosmicheskoy deyatel'nosti Rossii do 2030 goda* [Russia Space Activity Development Strategy at 2030]. Available at: https://www.roscosmos.ru/23380/ (Accessed 14 March 2017).

3. *Proekt dolgosrochnoy programmy razvitiya OAK do 2025 goda* [Long-term Development UAC Program Project at 2025]. Available at: http://uacrussia.ru/ru/press-center/news/news_646146 (Accessed 14 May 2017).

4. Tihonov A. I. [Problems and prerequisites of competitiveness of aircraft engines]. *Vestnik universiteta (Gosudarstvennyy universitet upravleniya).* 2014, No. 14, P. 262–267 (In Russ.).

5. Zelencova L. S., Voroncov V. B. [Engineering and management education as a national priority]. *Vestnik universiteta (Gosudarstvennyy universitet upravleniya).* 2013, No. 12, P. 234–238 (In Russ.).

6. *Forsayt kompetentsiy 2030* [Competence Foresight 2030]. Available at: http://asi.ru/molprof/foresight/12264/ (Accessed 30 march 2017).

7. Kraev V. M., Tikhonov A. I. [A risk management in staff management]. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii.* 2016, No. 8-2 (21), P. 22–25 (In Russ.).

8. Shumik E. S. [Modern education system: opportunities or obstacles for the reproduction of engineering, engineering and management personnel]. *Izvestiya DVFU. Ekonomika i upravlenie.* 2014, No. 2, P. 41–50 (In Russ.).

9. Zelencova L. S. [Import substitution. Educational aspect]. *Upravlencheskie nauki v sovremennom mire.* 2015, Vol. II, No. 1, P. 262–267 (In Russ.).

10. Kraev V. M., Tikhonov A. I. *Upravlencheskiy konsalting v aviatsionno-kosmicheskom komplekse* [Administrative consulting in an aerospace complex]. Moscow, Dobroe slovo Publ., 2016, 104 p.

11. Kalacheva L. V. [Increase of the level of the personnel potential of the mining complex in the conditions of innovation activity on the basis of the alliance of universities and coal companies]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'.* 2014, No. S11, P. 31–38 (In Russ.).

12. Zelencova L. S., Voroncov V. B. [Prospects for the development of engineering, management and industry education]. *Vestnik universiteta (Gosudarstvennyy universitet upravleniya.* 2013, No. 12, P. 229–234 (In Russ.).

13. Kraev V. M., Tikhonov A. I. Features of personnel work at the entities of defense industry complex for increase in an economic safety In the collection: K. E. Tsiolkovsky's ideas in innovations of science and technology materials of 51 Scientific readings memory of K. E. Tsiolkovsky. 2016, P. 447–448.

14. Shhedrovickij G. P. [Organization, leadership, management. Course of lectures]. *Organizatsiya, rukovodstvo, upravlenie. Kurs lektsiy*. 2009.

15. Okuneva T. G., Podverbnykh O. E. [Organizational and economic approach in management of preparation of engineering personnel in system of the higher education]. *Upravlenie chelovecheskimi resursami – osnova razvitiya innovatsionnoy ekonomiki : Materialy VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Human resources management – a basis of development of innovative economy]. (March 21-23, 2015, Krasnoyarsk). 2015, No. 6, P. 191–194.

© Подвербных О. Е., Краев В. М.,
Тихонов А. И., 2017

УДК 338.2

Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 981–992

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СТРАТЕГИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ ТОСЭР В ЗАТО АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

М. Б. Пучкин

Консалтинговое агентство «MBP Consulting»
Российская Федерация, 660028, г. Красноярск, ул. Телевизорная, 1
E-mail: poochkin@yandex.ru

Рассмотрены теоретические подходы к управлению устойчивым развитием создаваемых в ЗАТО атомной отрасли ТОСЭР с использованием инструментов стратегического управления. Актуальность выбранной темы исследования обусловлена кризисным состоянием экономики, действием режима экономических санкций в отношении России и необходимостью в этой связи скорейшего запуска механизмов экономического роста. Точками роста новой экономики с иными принципами функционирования в регионах России могут стать создаваемые ТОСЭР. Особый научный интерес представляют не имеющие аналогов в мире ЗАТО атомной отрасли. Данные локальные административно-территориальные образования обладают необходимыми ресурсами и огромным научным и инновационным потенциалом для развития. В рамках существующей нормативно-правовой базы ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли могут создаваться на срок до десяти лет с возможностью дальнейшего продления ещё на пять лет. Успешно управлять развитием ТОСЭР в длительной временной перспективе возможно только в рамках стратегического управления. Приведён анализ теоретических основ и методологического обеспечения стратегического управления на современном этапе. Он показывает, что инструменты стратегического управления успешно используются не только в корпоративном секторе, но и в области регионального развития. Однако теория и методология стратегического управления применительно к таким сложным системам, как ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли, в настоящее время практически отсутствуют. Разработка теоретических положений и методологической базы стратегического управления ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли возможна только с учётом имеющейся отраслевой специфики, а также сложности ТОСЭР как социально-экономической системы. Применительно к ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли предлагается использовать дополненную автором модель стратегического управления Гарвардской школы бизнеса. Эта модель имеет стройную и логическую структуру, чёткий алгоритм действий. Отмечается, что данная модель включает в себя пять этапов: стратегический анализ, моделирование стратегии, формулирование стратегии, выбор стратегии, реализация стратегии. Использование инструментов стратегического управления для целей обеспечения устойчивого развития ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли позволит решить ряд важнейших задач, среди которых сохранение и развитие кадрового потенциала ракетно-космической отрасли, импортозамещение в атомной отрасли, развитие сектора экспортно ориентированной гражданской продукции, стабилизация социально-экономической ситуации в ЗАТО атомной отрасли.

Ключевые слова: стратегическое управление, инструменты стратегического управления, ТОСЭР, ЗАТО атомной отрасли.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 981–992

THEORETICAL APPROACHES TO STRATEGIC MANAGEMENT OF TOSER IN THE NUCLEAR INDUSTRY ZATO

M. B. Poochkin

Consulting agency “MBP Consulting”
1, Televizornaya Str., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation
E-mail: poochkin@yandex.ru

The article deals with theoretical approaches to governance of sustainable development created in TOSER of the nuclear industry ZATO using the tools of strategic management. The relevance of the chosen research topic is due to the economic crisis, the regime of economic sanctions against Russia and the need for the speedy launch of the mechanisms of economic growth. “Points of growth” of the new economy with different principles of operation in the regions of Russia can be created by TOSER. The nuclear industry ZATO which has no analogues in the world is of special scientific interest. The local administrative-territorial units have the necessary resources and huge scientific and innovation potential for development. In the framework of the existing legal framework TOSER in the nuclear industry ZATO can be created for up to ten years with an option of renewal for another five years. To successfully manage the development of TOSER in a long time perspective is possible only within the framework of strategic management. In the article

the analysis of theoretical grounds and methodological support of strategic management at the present stage is given. It shows that strategic management tools are successfully used not only in the corporate sector, but also in the field of regional development. However, the theory and methodology of strategic management as applied to such complex systems like the TOSER in the nuclear industry ZATO is currently almost nonexistent. Development of theoretical principles and methodological basis of strategic management in TOSER of the nuclear industry ZATO is only possible taking into account existing sectoral specifics and the complexity of the TOSER as a socio-economic system. With regard to TOSER in the nuclear industry ZATO it is encouraged to use the model of strategic management from Harvard business school enlarged by the author. This model has a harmonious and logical structure, a clear sequence of actions. The author notes that this model includes five phases: strategic analysis; strategy simulation; formulation of strategy; choice of strategy; implementation of strategy. The use of strategic management tools for sustainable development of TOSER in the nuclear industry ZATO will allow you to resolve a number of important tasks, including: retention and development of personnel potential of the space industry; import substitution in the nuclear industry; development of export-oriented sector of civil production; stabilization of the socio-economic situation in the closed nuclear industry.

Keywords: strategic management, strategic management tools, the territories of priority socio-economic development (TOSER), nuclear industry ZATO.

Введение. По мнению большинства учёных мировую экономику в ближайшее время ожидает очередной фазовый переход к экономике с принципами функционирования, обеспечивающими эффективное использование ресурсов. В связи с этим традиционные методы управления должны быть трансформированы с помощью новых подходов и современных инструментов, в первую очередь, стратегического управления. Происходящие в мире глобальные изменения ставят перед Россией сложные амбициозные задачи по достижению и удержанию научного, технологического и производственного лидерства. Решать задачи подобного плана можно только в рамках системного, поступательного долгосрочного планирования, что является значимым для стратегического управления в целях устойчивого развития региональных экономик, национальной экономики и социальной сферы. В этой связи крайне важно определить «локомотивы», «драйверы» экономического роста. Точками роста в регионах, по мнению российских учёных и экономистов, могут и должны стать ЗАТО атомной отрасли. Раскрыть их потенциал призваны механизмы, заложенные в институте создаваемых территорий социально-экономического развития (ТОСЭР). В соответствии с существующей нормативно-правовой базой, в ЗАТО они могут создаваться сроком на десять лет с возможностью продления ещё на пять лет. Учитывая это, крайне важным представляется использование в полной мере инструментов долгосрочного планирования и стратегического управления для обеспечения устойчивого развития ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли. Актуальность данной темы исследования обусловлена действующими экономическими санкциями в отношении России, сложной мировой финансовой ситуацией, неблагоприятной конъюнктурой мировых цен на энергоносители, что требует использования современных управленческих технологий для опережающего долгосрочного экономического роста.

Стратегическое управление как экономическая категория. В настоящее время стратегическое управление является важнейшим видом управленческой деятельности, направленной на устойчивое развитие социально-экономических систем разной степени сложности [1]. Обычно стратегическое управление раскрывается через такие категории, как стратегия, миссия, внутренняя среда, внешняя среда, стратегический анализ, стратегическое планирование, стратегическое решение, стратегическое мышление и видение, целеполагание, конкурентное преимущество (табл. 1) [2].

Существует множество определений стратегического управления (менеджмента). Согласно одним подходам стратегическое управление – это вид управленческой деятельности, направленный на достижение долгосрочных целей. Согласно другим авторам, стратегическое управление – это процесс анализа ситуации, выработки, принятия, реализации и контроля выполнения стратегического решения. Одним из основоположников стратегического менеджмента считается Альфред Чандлер. Именно он в 1960 году впервые ввёл в научный оборот понятие «стратегия» как определение основных долгосрочных целей и задач предприятия и утверждение курса действий, распределение ресурсов, необходимых для достижения этих целей. В своей работе «Стратегия и структура: Главы из истории американского промышленного предприятия» Чандлером были сформулированы ключевые концепции и задачи современной теории стратегического управления. Согласно предложенной Чандлером концепции стратегия должна определить основные долговременные цели экономической системы, а также оптимальным образом систематизировать действия и ресурсы для их достижения. Чандлер выявил существенные различия между стратегией и структурой экономической системы, а также между процессами формирования и реализации стратегии. Чандлер утверждал, что именно стратегия экономической системы определяет её структуру, а не наоборот. «Если стратегия следует за структурой, результат всегда будет неэффективным», – подчёркивал в своей работе Чандлер. Кроме этого, он указывал на большую значимость профессионального менеджмента, называя его «видимой рукой» рынка, которая определяет структуру всей государственной экономики [3]. Вместе с тем ряд авторов, в частности Джозеф Стиглиц в своей работе «Цена неравенства. Чем расслоение общества грозит нашему будущему», отмечает важную роль государства в стратегическом управлении как на уровне корпораций, так и в части регионального развития. В этой связи дальнейшее развитие

теории стратегического управления на уровне регионов и муниципальных образований представляется крайне необходимым и актуальным.

Теоретические основы стратегического управления. Все существующие модели стратегического управления построены на одной и той же теоретической конструкции и отличаются в деталях, а не в базовых принципах построения. Исследователи выделяют десять «школ стратегий» со своими моделями стратегического управления [4]. Из наиболее распространённых необходимо выделить модель стратегического управления Гарвардской школы бизнеса (рис. 1). Данную модель ещё называют моделью школы проектирования, так как формирование стратегии рассматривается как процесс, основанный на нескольких базовых принципах [5].

Таблица 1

Экономические категории, раскрывающие сущность стратегического управления*

Категория	Определение, понятие
Стратегия	Долгосрочный план действий в условиях неопределённости
Миссия	Элемент стратегии, отражающий возможности удовлетворять существующие на рынке потребности
Внутренняя среда	Люди, средства производства, информация и деньги
Внешняя среда	Совокупность условий и факторов, в которых протекает деятельность
Стратегический анализ	Инструмент стратегического управления, с помощью которого выявляется и оценивается текущая деятельность с целью выявления наиболее перспективных направлений развития
Стратегическое планирование	Процесс поддержания стратегического соответствия между целями, потенциальными возможностями, ресурсами и рыночной ситуацией
Стратегическое решение	Совокупность взаимосвязанных, целенаправленных и логически последовательных управленческих действий, обеспечивающих реализацию долгосрочных целей
Стратегическое видение	Инструмент корпоративной культуры в виде описания образа будущего и перспективных направлений развития
Стратегическое целеполагание	Процесс построения системы основных ориентиров долгосрочного развития
Конкурентное преимущество	Комплекс факторов (активы, характеристики и особенности), создающих выгодную рыночную позицию

* Составлено автором по материалам экономического словаря (www.dic.vocable.ru).

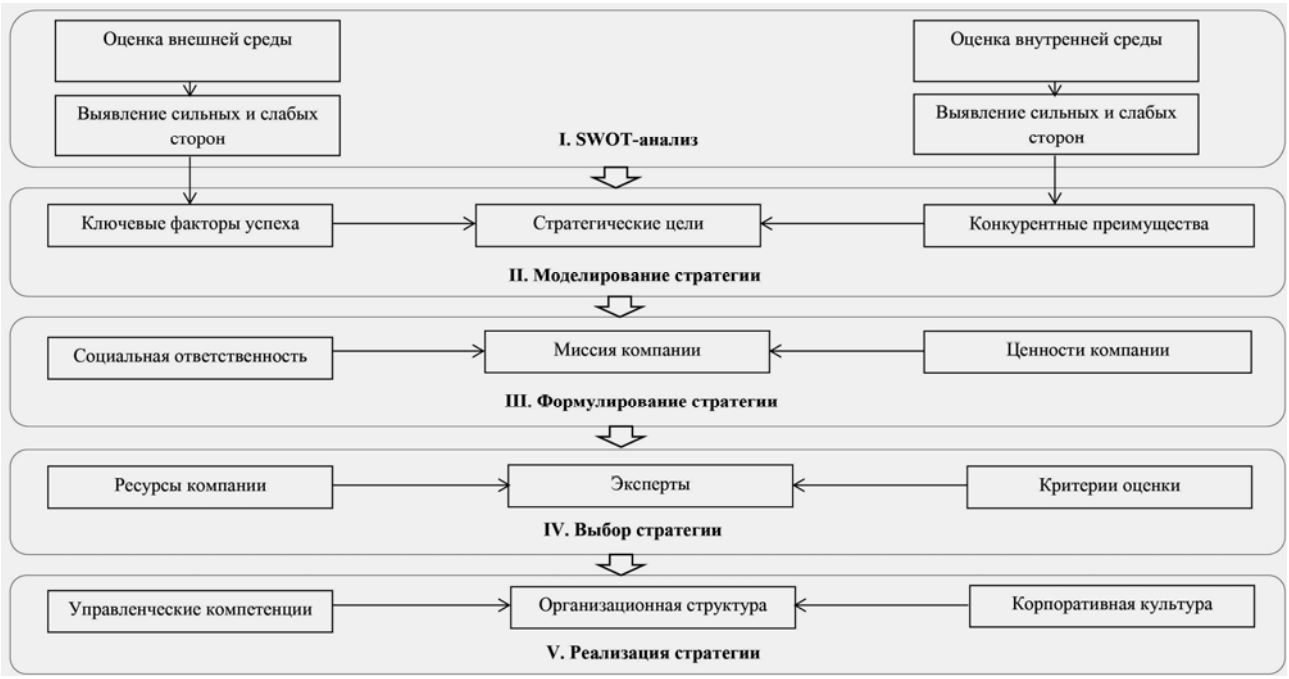


Рис. 1. Модель стратегического управления Гарвардской школы бизнеса (дополнено автором)

Fig. 1. The model of strategic management from Harvard business school (enlarged by the author)

Как следует из рис. 1, для модели стратегического управления Гарвардской школы бизнеса характерны достаточная простота, последовательность и строгая логика действий. Кроме этого, данная модель содержит ограниченное количество исходных данных и информации о социально-экономической системе. В связи с этим модель стратегического управления Гарвардской школы бизнеса (после небольших дополнений) наилучшим образом подходит для целей устойчивого развития ТОСЭР.

Необходимо отметить, что наиболее популярные альтернативные модели стратегического управления подходят для целей устойчивого развития ТОСЭР в меньшей степени. По мнению ряда исследователей, модель И. Ансоффа чересчур сложна и громоздка для практического применения [6]. Она слишком детализирована и представляет собой «инженерный» взгляд на процесс стратегического планирования и управления. Достаточно популярная модель стратегического управления Г. Стейнера построена на попытках объединить модель Гарвардской школы бизнеса и модель И. Ансоффа. Однако при определённом улучшении отдельных характеристик модели она всё же не избавлена от громоздкости, а также сложности применения на практике [7].

Вопросы стратегического управления в корпоративном секторе изучены достаточно подробно. В настоящее время заметно развиваются и дополняются теория и методологические основы стратегического управления в государственном секторе экономики и органах государственного управления. В то же время вопросы стратегического управления в ТОСЭР изучены слабо и требуют особого внимания, так как ТОСЭР являются точками роста в социально-экономической системе региона.

Этапы и инструменты стратегического управления в современных условиях. Стратегическое управление в настоящее время в основном реализуется в рамках пяти основных этапов (процессов или фаз) (рис. 2).

Как следует из рис. 2, исследователями в области стратегического управления выделяются следующие этапы [4]:

1) стратегический анализ;
2) стратегическое целеполагание;
3) разработка стратегии;
4) реализация стратегии;
5) оценка результатов.

Первый этап – *стратегический анализ* – является одним из ключевых аналитических элементов стратегического управления. Именно он определяет стратегические возможности и перспективы развития. Основной задачей первого этапа стратегического управления – стратегического анализа является оценка ключевых факторов внешней и внутренней среды и определение степени их влияния на будущее развитие. Результаты стратегического анализа позволяют снять значительную часть неопределённостей при принятии управленческих решений на последующих стадиях стратегического управления. Это достигается за счёт преобразования информации о состоянии внешней и внутренней среды в базу данных для принятия управленческих решений. Таким образом обеспечивается эффективность принятия стратегических решений.

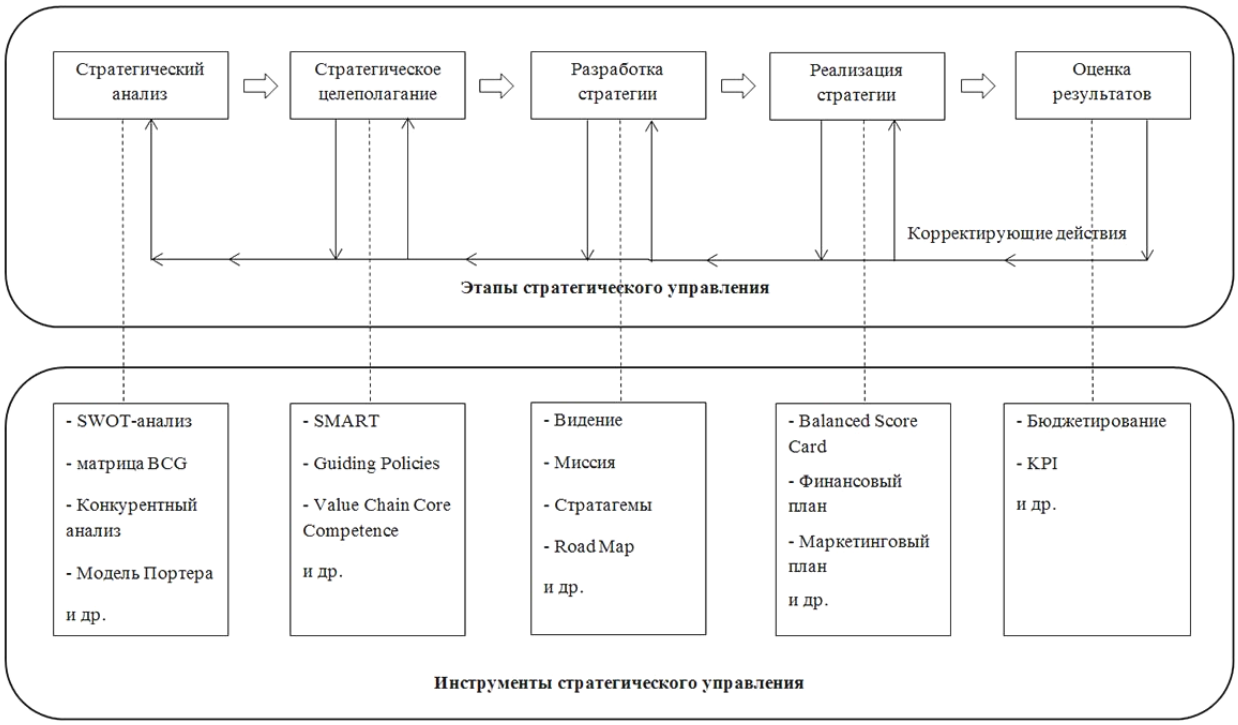


Рис. 2. Этапы и инструменты стратегического управления (дополнено автором)

Fig. 2. Stages and tools of strategic management (enlarged by the author)

Вторым этапом стратегического управления является *целеполагание*, или определение стратегических целей развития. Стратегические цели – это система основных ориентиров долгосрочного развития. В отличие от стратегического видения и стратегических установок, а также миссии (которые предшествуют формулированию стратегических целей), стратегические цели обладают рядом специфических характеристик, которые предложил Питер Друкер в 1954 году. Согласно его методике целеполагания SMART стратегические цели должны быть:

– конкретными (specific);
– измеряемыми (measurable);
– достижимыми (achievable);
– реалистичными (realistic);
– ограниченными по времени (timed).

Результатом этапа стратегического целеполагания является построение системы долгосрочных ориентиров развития, а также формирование политики по основным перспективным направлениям деятельности.

Разработка стратегии осуществляется на третьем этапе стратегического управления и базируется на результатах первых двух этапов: базе данных для принятия долгосрочных управленческих решений и стратегических целях. Работа на данном этапе нацелена на выбор одной из стратегической альтернативы, сформулированной на первом и втором этапе. Непосредственный момент выбора окончательного вида стратегии осуществляется при переходе от прогнозирования (второй этап стратегического управления) к стратегическому планированию (третий этап) на основе результатов стратегического анализа (первый этап).

Четвёртый этап стратегического управления, или *реализация стратегии*, включает в себя решение конкретных стратегических задач и достижение установленных количественных и качественных стратегических показателей. Наилучшие результаты при реализации стратегии даёт применение проектного подхода. Его характеристики и принципы наилучшим образом отвечают требованиям показателя достижимости стратегических целей развития. Однако для повышения эффективности этапа реализации стратегии требуется:

– создание действенных механизмов реализации стратегии, обеспеченных организационно (отдельно выделенная структура) и ресурсами (кадровыми, финансовыми, материальными, информационными и др.);
– получение и развитие теоретических знаний и практических навыков стратегического управления;
– создание системы мотивации для реализации стратегии.

Пятым этапом стратегического управления является *оценка результатов реализации стратегии.* В рамках данного этапа решаются следующие задачи:

– формирование системы контрольных показателей;
– установление критериев оценки соответствия достижения стратегических целей относительно принятых стандартов, нормативов и эталонных показателей;
– выяснение причин отклонений достигнутых значений от установленных принятой и реализуемой стратегией;
– осуществление корректирующих действий в случае их необходимости.

Стратегическое управление на разных его стадиях реализуется за счёт использования соответствующих инструментов (табл. 2). Основными инструментами, используемыми в рамках стратегического управления, являются SWOT-анализ, модель пяти сил Портера, система целеполагания по методике SMART, система сбалансированных показателей (Balanced Score Card), система финансового и маркетингового планирования, система бюджетирования, система ключевых показателей (KPI) [8].

В табл. 2 приведены основные инструменты, используемые на разных этапах стратегического управления. Все методы стратегического управления укрупнённо разделяют на формальные модели и количественные методы, авторские методические разработки и качественные методы. В стратегическом управлении применяются как сугубо специфические инструменты, такие как метод построения стратагем, так и инструменты риск-менеджмента (метод отказа, метод принятия и др.), а также инструменты проектного управления (диаграмма Ганта, диаграмма Ишикавы и др.) [8].

Таблица 2

Характеристики основных инструментов стратегического управления*

Инструмент	Краткая характеристика
Этап 1. Стратегический анализ	
SWOT-анализ	Метод анализа, использующийся для оценки влияния на проект внешних и внутренних факторов. Согласно данному методу все факторы делятся на четыре категории: strengths (сильные стороны), weaknesses (слабые стороны), opportunities (возможности) и threats (угрозы). Метод включает определение цели проекта и выявление внутренних и внешних факторов, способствующих или осложняющих достижение стратегических целей
Модель Портера	Методика анализа отраслей и выработки стратегии развития бизнеса. Предусматривает анализ пяти сил и проведение анализа угрозы появления продуктов-заменителей, угрозы появления новых игроков, рыночной власти поставщиков, рыночной власти потребителей, уровня конкуренции
Этап 2. Стратегическое целеполагание	
Методика SMART	Методика формулирования целей, предусматривающая соблюдение к ним специфичных требований. Согласно методике SMART цели должны быть конкретными (specific), измеряемыми (measurable), достижимыми (achievable), реалистичными (realistic), ограниченными по времени (timed)

Окончание табл. 2

Инструмент	Краткая характеристика
Guiding Policies (руководящие принципы разработки стратегии)	Методика выделения ключевых перспективных направлений и областей деятельности и формулирование принципиальных подходов и принципов при составлении стратегических прогнозов и сценариев развития
Этап 3. Разработка стратегии и стратегическое планирование	
Стратагемы	Методика составления краткого оригинального плана в виде алгоритма действий, построенного на глубоком изучении ситуации и конкретного конкурентного окружения. Стратагемы строятся для каждого из возможных сценариев развития
Road Map (дорожные карты)	Методика детального планирования на основе принятой миссии и разработанной стратегии, описывающая ключевые этапы развития каждого из направлений деятельности
Этап 4. Реализация стратегии	
Balanced Score Card (система сбалансированных показателей эффективности)	Система доступных и достоверных показателей деятельности, позволяющая своевременно получать информацию об отклонениях от заданных плановых значений, а также предупреждать или устранять причины таких отклонений, производя корректирующие действия
Этап 5. Контроль за реализацией стратегии и оценка результатов	
KPI (система ключевых показателей эффективности)	Инструмент измерения достижения целей. Система количественных и качественных индикаторов, отражающих результативность и эффективность каждого из направлений деятельности по каждой из установленной для них цели

* Составлено автором по материалам экономического словаря (www.dic.vocable.ru).

Таким образом, современная теория стратегического управления имеет стройную структуру и развитый инструментарий. Модель стратегического управления, рассматриваемая в статье, состоит из пяти последовательных этапов, логически увязанных друг с другом. Существующие методические разработки в области стратегического управления могут не только использоваться в корпоративном секторе, но также, в силу достаточной универсальности их подходов и принципов, быть применимы к государственному управлению, в том числе в сфере регионального и муниципального развития.

ТОСЭР как региональная точка социально-экономическая роста. Территория опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР) – часть территории субъекта Российской Федерации, включая закрытое административно-территориальное образование (ЗАТО), на которой в соответствии с решением Правительства Российской Федерации установлен особый правовой режим осуществления предпринимательской и иной деятельности. ТОСЭР создаются в Российской Федерации на основании принятого 29 декабря 2014 года Федерального закона № 473-ФЗ. Целью создания ТОСЭР является выравнивание уровня социально-экономического развития регионов России за счёт создания условий для их опережающего роста. В ходе создания ТОСЭР в регионах России, включая закрытое административно-территориальное образование, решаются следующие задачи [9]:

1) формирование в территориях необходимой для их опережающего развития инфраструктуры;
2) создание благоприятного инвестиционного климата;
3) реализация государственно-частного партнёрства;
4) создание импортозамещающих производств с экспортным потенциалом;
5) создание новых высокотехнологичных рабочих мест;
6) развитие человеческого потенциала на территории;
7) улучшение качества жизни граждан.

В силу использования отечественными и иностранными предпринимателями налоговых льгот и упрощённых административных и таможенных режимов ТОСЭР становятся региональными точками не только промышленного, технологического, инновационного, но и социально-экономического развития. Во многом это обусловлено нацеленностью законодателей на стимулирование создания в ТОСЭР производств 4-го (микроэлектроника, информатика, биотехнология, генная инженерия, новые виды энергии, новые материалы, освоение космоса, спутниковая связь и т. п.) и 5-го технологических укладов (робототехника, биотехнологии, молекулярная биология и генная инженерия, нанотехнологии, искусственный интеллект и нейронные сети, глобальные информационные сети, интегрированные высокоскоростные транспортные системы, конструкционные материалы с заранее заданными свойствами, гибкие автоматизированные производства, водородная и возобновляемая энергетика) [10].

ТОСЭР является сложной социально-экономической системой, так как является многофакторной, многоэлементной и динамической системой. Как показывает мировой опыт, сложные системы плохо реагируют на одномоментные управленческие действия и эксперименты. Алгоритм стратегического управления такой сложной социально-экономической системой, как ТОСЭР, должен иметь системный, циклический, повторяющийся характер. С каждым циклом стратегического управления модель (описание) ТОСЭР как социально-экономической системы должна становиться проще и эффективнее [11]. Этому в том числе может способствовать использование в управлении ТОСЭР инструментов проектного управления. Использование таких инструментов, как проектный офис, библиотека проектов, проектное финансирование, KPI и др., может способствовать решению задачи минимизации финансовых потерь при управлении сложными социально-экономическими системами, что особенно важно в условиях дефицитов федерального и регионального бюджетов [12].

Особенность ТОСЭР как сложной социально-экономической системы в том, что она одновременно является:

– подсистемой социально-экономической мезосистемы региона (субъекта Российской Федерации);

– надсистемой для социально-экономических микросистем резидентов ТОСЭР (хозяйствующих субъектов на её территории – юридических лиц и индивидуальных предпринимателей).

Ввиду дуализма сущностного содержания ТОСЭР как сложной системы, необходимо учитывать её особенности и специфические характеристики, влияющие на процесс стратегического управления.

Особенности стратегического управления ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли. Необходимо отметить значительный вклад в теорию стратегического управления устойчивым развитием территориальных образований, который внесли такие зарубежные авторы, как К. Боумен, П. Друкер, Б. Карлофф, А. А. Томсон, и отечественные учёные – О. С. Виханский, А. П. Градов, В. С. Ефремов, Р. А. Фатхутдинов. В области развития теории и практики стратегического управления территориальными образованиями необходимо отметить работы А. А. Гапоненко и А. П. Панкрухина. Проблемы развития территорий с особым режимом хозяйствования (ТОСЭР) раскрываются в работах Е. Ф. Авдокушкина, В. В. Асаула, Т. П. Данько, Р. И. Зименкова, Е. А. Каргуляна, Ю. И. Кузнецова, Е. В. Логиновой, П. В. Павлова, С. В. Приходько, С. А. Шарапова и др.

Однако до настоящего времени недостаточно проработанными остаются вопросы стратегического управления сложными социально-экономическими системами, например ТОСЭР. Это во многом связано с тем фактом, что для ТОСЭР (ввиду их специфики) напрямую не подходят инструменты ни стратегического корпоративного управления, ни стратегического управления в органах государственной власти.

Особый научный интерес представляет изучение вопросов, связанных со стратегическим управлением ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли. В отечественной, а тем более в зарубежной научной литературе и управленческих методических разработках нет комплексного теоретического решения вопросов, связанных со стратегическим управлением ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли (ввиду специфики и отсутствия подобных обособленных территориальных образований в мире). Вместе с тем, ЗАТО атомной отрасли потенциально (обладая явными конкурентными преимуществами и уникальными ресурсами) являются точками регионального социально-экономического роста, опережающего инновационного и технологического развития, а также «драйверами» формирования на территории Российской Федерации новой, циркулярной экономики.

В связи с этим возникает необходимость систематизации ключевых теоретических элементов стратегического управления применительно к ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли, а также разработки концептуального подхода и модели стратегического управления такими ТОСЭР как наиболее развитыми социально-экономическими системами с высоким инновационным, технологическим, производственным и человеческим потенциалом. В частности, для формирования теоретической основы стратегического управления ТОСЭР и методологического обеспечения требуется:

– уточнение понятие «стратегическое управление ТОСЭР», в том числе для различных типов и специфики регионов их размещения;

– уточнение принципов стратегического управления ТОСЭР;

– адаптация существующих инструментов стратегического управления для целей управления устойчивым развитием ТОСЭР;

– разработка собственной законодательной и нормативной базы стратегического управления ТОСЭР (с учётом специфики регионов их размещения);

– формирование методологического обеспечения, деятельности, стратегического планирования и управления ТОСЭР.

Прежде чем раскрывать понятие стратегического управления ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли, необходимо отметить ряд его особенностей. Стратегический анализ, стратегическое планирование и стратегическое управление устойчивым развитием ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли осуществляется в рамках и с обязательным учётом стратегии социально-экономического, инновационного и технологического развития Российской Федерации и требует взаимной увязки, а при необходимости и корректировки. В настоящее время в Российской Федерации приняты и реализуются соответствующие стратегии до 2020 года, разработаны и проходят обсуждение и принятие соответствующие стратегии до 2030 года. Также необходимо принимать во внимание и учитывать стратегию развития Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года. В рамках стратегического управления ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли также следует руководствоваться стратегией развития Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Миссия ГК «Росатом» – обеспечить мир чистой, безопасной, доступной энергией и инновациями на основе атомных технологий. Ценностью ГК «Росатом» определены эффективность, безопасность, опережающее развитие, ответственность, уважение и коллективизм. Сутью стратегии развития ГК «Росатом» является трансформация в глобального лидера отрасли за счёт развития новых направлений деятельности, а стратегическими целями заявлены [14]:

– повышение доли на международных рынках;

– снижение себестоимости продукции и сроков протекания процессов;

– разработка новых видов продукции и услуг.

Данный специфический подход (взаимная увязка стратегий разного уровня и разных ведомств) нашёл своё отражение при формировании стратегии социально-экономического развития до 2030 г. ЗАТО г. Железногорск Красноярского края. При разработке указанной стратегии помимо учёта векторов федерального и ведомственного развития были использованы стратегические направления развития региона нахождения ТОСЭР (в данном случае – проект стратегии социально-экономического развития Красноярского

края до 2030 года). Сутью стратегии устойчивого развития ЗАТО г. Железногорск до 2030 года является его трансформация в инновационную столицу Красноярского края. Этого планируется достичь в рамках создаваемой ТОСЭР путём ускоренного перехода к инновационной экономике за счёт развития ядерных и космических технологий Госкорпораций «Роскосмос» и «Росатом», создания в ЗАТО г. Железногорск безопасной и комфортной городской среды и повышения качества жизни населения [15].

Реализуя все этапы стратегического управления – от стратегического анализа до реализации стратегии и оценки результатов – применительно к ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли, необходимо принимать во внимание не только внутриотраслевую специализацию каждого из десяти ЗАТО атомной отрасли, но и иные характеристики (табл. 3).

При проведении стратегического анализа, при разработке и реализации стратегии, оценке результатов необходимо обязательно учитывать такие показатели, как численность населения ЗАТО и динамику его изменения. Существенное влияние на формирование стратегических альтернатив и определение направлений развития также оказывает технологическая специализация в рамках атомной отрасли градообразующего предприятия. Важными факторами, влияющими на процесс и результаты стратегического управления, являются площади закрытых муниципальных образований, наличие свободных территорий под перспективную промышленную и жилую застройку, а также удалённость от столицы региона расположения ЗАТО.

Ряд авторов рассматривают регион как подсистему национальной экономики и обосновывают понятие стратегического управления устойчивым развитием региона как процесс изменения социально-экономической системы, направленный на повышение благосостояния его населения, обеспечивающий устойчивость системы в настоящем и будущем, способствующий усилению его конкурентоспособности [13]. Однако, по мнению автора, данное определение не подходит для ТОСЭР. Согласно авторскому подходу ТОСЭР рассматривается как подсистема региональной экономики, с одной стороны, и надсистема для резидентов ТОСЭР – с другой. Автором предложено и определение понятия стратегического управления устойчивым социально-экономическим развитием ТОСЭР как комплексное системное управление развитием в течение длительного времени ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли, основанное на эффективном взаимодействии экономического, экологического и социального элементов в ходе одновременного использования различными субъектами ТОСЭР имеющихся форм капитала (произведенного, природного, человеческого и др.) в целях повышения благосостояния населения, улучшения экологической обстановки и усиления конкурентоспособности региона.

Таблица 3

Основные характеристики ЗАТО атомной отрасли*

№ п/п	ЗАТО	Субъект РФ	Население, тыс. чел. / площадь, Га	Годовой прирост (+) / убыль населения (–), чел	Удалённость от регионального центра, км	Базовые предприятия
Центральный регион						
1	Саров	Нижегородская область	94,5 / 33,4	490	130	ВНИИЭФ
2	Заречный	Пензенская область	64,0 / 213	210	12	ПО «Старт»
Уральский регион						
3	Трёхгорный	Челябинская область	32,5 / 4,6	–180	210	ПСЗ
4	Новоуральск	Свердловская область	95,0 / 188	–410	65	Уральский ЭКХ
5	Снежинск	Челябинская область	50,3 / 65,4	290	120	ВНИИТФ
6	Лесной	Свердловская область	49,2 / 14,5	50	220	Электро-прибор
7	Озёрск	Челябинская область	79,5 / 84,5	–400	110	ПО «Маяк»
Сибирский регион						
8	Железногорск	Красноярский край	84,5 / 24	–110	58	ИСС им. М. Ф. Решетнёва, ГХК
9	Зеленогорск	Красноярский край	65,0 / 21,3	–640	154	ЭХЗ
10	Северск	Томская область	107,9 / 4850	–530	18	СХК

* По данным официального сайта www.zato.tv (составлено автором).

Специфика ЗАТО атомной отрасли и их существенные отличия друг от друга подтолкнули законодателей ввести дополнительные критерии для создания ТОСЭР в закрытых территориальных образованиях [14]. Необходимо отметить следующие специфические законодательные требования к создаваемым в ЗАТО атомной отрасли ТОСЭР:

– проекты резидентов ТОСЭР должны быть обеспечены финансированием, а размер инвестиций составлять не менее 2,5 млн руб. (уменьшено по сравнению с обычным порядком);

– количество создаваемых новых рабочих мест по каждому из проектов резидентов должно быть не меньше 10 (уменьшено по сравнению с обычным порядком);

– проекты должны быть обеспечены свободными земельными участками в ЗАТО атомной отрасли (новелла);

– проекты резидентов ТОСЭР должны обладать высоким экспортным потенциалом;

– проекты резидентов ТОСЭР должны быть включены в утверждённую ГК «Росатом» продуктовую стратегию (импортозамещения и развития экспорта) (новелла);

– проекты резидентов ТОСЭР должны находиться в одном из приоритетных видов деятельности: производственная и строительная; научно-технические разработки и исследования; коммерциализация результатов НИР, НИОКР; высокотехнологические услуги (для градообразующих предприятий ЗАТО).

В целях установления групп интересов необходимо определить основных бенефициаров создания ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли. Основными заинтересованными сторонами устойчивого развития ЗАТО атомной отрасли выступают органы исполнительной власти разных уровней, представители бизнеса и население ЗАТО (табл. 4).

Как следует из табл. 4, устойчивое развитие ЗАТО атомной отрасли через механизм территорий опережающего социально-экономического развития со льготными налоговыми, таможенными и административными режимами может быть реализовано в рамках сочетания интересов всех основных субъектов его управления – органов государственной власти, государственных корпораций и органов местного самоуправления. В процесс стратегического управления ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли могут и должны быть вовлечены не только население ЗАТО, но и региональная и отраслевая наука, высокотехнологический и инновационный бизнес, а также некоммерческие общественные организации. Данное сочетание различных интересов предполагает их совместное участие в принятии стратегических решений через координирующие органы ТОСЭР. Стратегические решения направлены на создание условий для экономической привлекательности ЗАТО атомной отрасли для инвесторов и населения, а также для обеспечения устойчивого социально-экономического развития этих территорий.

Ведущие российские учёные и руководители ГК «Росатом» и ГК «Роскосмос» по праву называют ЗАТО атомной отрасли территориями государственных интересов. Необходимо отметить, что в мире подобных научно-технологических территориально обособленных образований нет. Десять ЗАТО атомной отрасли, расположенные в центральной части России, на Урале и в Сибири, имеют особый режим безопасности, высокую обеспеченность социальной инфраструктурой и располагают высококвалифицированными кадрами. Российская Федерация в этом плане имеет значительное преимущество, которое может быть использовано вкупе с льготными налоговыми, таможенными и административными режимами ТОСЭР, давая значительные эффекты как для резидентов ТОСЭР, так и для атомной отрасли (табл. 5).

Таблица 4

Основные интересанты развития ЗАТО атомной отрасли*

№ п/п	Интересант	Ожидаемые результаты
1	Органы федеральной власти	Развитие высокотехнологичных отраслей, реализация программ импортозамещения, наращивание экспортного потенциала, обеспечение экономического роста за счёт развития регионов, улучшение социально-экономических показателей, повышение качества жизни населения
2	ГК «Росатом», ГК «Роскосмос»	Развитие новых перспективных направлений деятельности, реализация программ импортозамещения, увеличение объёмов экспорта высокотехнологичной продукции, создание новых рабочих мест, повышение социальной стабильности и привлекательности как работодателя
3	Органы региональной власти	Рост социально-экономических показателей региона за счёт опережающего развития ЗАТО, вовлечение в инновационную деятельность предприятий из соседних регионов и муниципалитетов
4	Органы местного самоуправления	Диверсификация и увеличение налогооблагаемой базы за счёт запуска перспективных производств, создание новых высокопроизводительных рабочих мест, улучшение социальной и экологической обстановки
5	Резиденты ТОСЭР	Ускоренный запуск и развитие новых инновационных производств, а также ускоренный возврат инвестиций за счёт использования льготных налоговых режимов ТОСЭР, упрощённого порядка таможенных и административных процедур и регулирования
6	Университеты и колледжи	Реализация НИР и НИОКР для резидентов ТОСЭР, возможность коммерциализации собственных перспективных разработок, а также прохождение производственной практики и последующее трудоустройство выпускников

Окончание табл. 4

№ п/п	Интересант	Ожидаемые результаты
7	НКО и общественные советы	Участие в разработке и реализации стратегии устойчивого развития ТОСЭР в интересах человека как зоны государственных интересов и точки технологического и инновационного роста формирующейся циркулярной экономики
8	Население ЗАТО	Получение современной городской инженерной, коммунальной, транспортной, социальной, культурной и спортивной инфраструктуры, создание экологической и безопасной среды обитания, повышение качества жизни

* По данным сайтов www.atomtor.ru, www.atomic-energy.ru (составлено автором).

Таблица 5

Основные эффекты создания ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли*

Резиденты ТОСЭР	
Эффект:	Значение
– сокращение объёма налоговых платежей	на 30 %
– снижение расходов на закупки	до 12 %
– финансирование производственной инфраструктуры	до 80 %
– сокращение затрат на закупку импортного оборудования	до 30 %
– сокращение сроков запуска новых видов продукции	на 15 %
– уменьшение сроков возврата НДС (заявительный порядок)	5 дней
– сокращение сроков выдачи разрешения на строительство	45 дней
Атомная отрасль:	
– поддержка выводимых производственных активов градообразующих предприятий ЗАТО	
– создание условий для выпуска новой гражданской продукции мирового уровня	
– стабилизация социально-экономической ситуации в ЗАТО	
– 100%-й контроль за работой подрядчиков (резиденты ТОСЭР) градообразующих предприятий ЗАТО	
– сохранение и развитие кадрового потенциала отрасли в ЗАТО	

* По материалам сайта www.atomtor.ru (составлено автором).

Рассматривая основные эффекты для резидентов ТОСЭР, создаваемых в ЗАТО атомной отрасли, необходимо отметить в первую очередь существенное (до 30 %) сокращение сроков окупаемости инвестиций в новые производства. Также привлекательными для инвесторов – резидентов ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли, являются небольшие сроки выдачи разрешения на строительство, упрощённый и ускоренный порядок возврата НДС, значительное (до 80 %) софинансирование объектов производственной инфраструктуры.

Государственная корпорация «Росатом», создавая ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли, решает целый ряд задач собственного стратегического развития. В частности, решается сложный вопрос поддержки выводимых из производственного оборота активов градообразующих предприятий ЗАТО атомной отрасли. В рамках механизмов формируемых в ЗАТО атомной отрасли ТОСЭР создаются благоприятные условия для выпуска гражданской продукции – в рамках отраслевой программы импортозамещения, а также с ориентацией на мировые рынки (развитие экспортного потенциала). Кроме этого, градообразующие предприятия получают контроль за качеством выпускаемой продукции резидентами ТОСЭР в рамках создания и функционирования замкнутых технологических цепочек (производственная кооперация внутри ЗАТО).

Следует также отметить положительные эффекты от создания ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли для экономики страны в целом и населения, приживающего в таких ЗАТО. Создание ТОСЭР на Дальнем Востоке, в моногородах и в ЗАТО атомной отрасли является продолжением государственной политики по интенсификации развития территориально локализованных точек роста в виде кластеров, особых экономических зон, наукоградов, инновационных платформ и т. д. Основной целью данной политики на данном этапе является необходимость воспользоваться благоприятными условиями международных финансовых, экономических и технологических санкций и возможностями собственной протекционистской политики для развития реального сектора экономики через территориально локализованные точки роста. ЗАТО атомной отрасли подходят для этих целей наилучшим образом. Корректировка промышленной политики Российской Федерации в связи с режимом международных санкций должна дать положительный эффект и за счёт создания новых рабочих мест в создаваемых ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли. Заработные платы на этих рабочих местах обеспечат дополнительный внутренний платёжеспособный спрос на продукцию и услуги, что должно способствовать запуску экономического роста в современных сложных условиях [16]. Повышение реальных доходов населения, рост деловой активности бизнеса и увеличение налоговых отчислений, в свою очередь, позволят стабилизировать социально-экономическую ситуацию в ЗАТО атомной отрасли, а также прекратить из них отток населения и сделать эти наукограды привлекательными не только для работы, но и для жизни, создав благоприятные социальные условия и обновив инженерную и коммунальную инфраструктуру. Во многом это станет решением ещё одной важной проблемы атомной отрасли –

проблемы сохранения и развития кадрового потенциала.

ЗАТО атомной отрасли могут и должны стать «локомотивом» нового витка развития в отдельных секторах экономики, в первую очередь в атомной и смежных отраслях. Во многом это обусловлено наличием в них необходимых для устойчивого развития ресурсов, а также огромным научно-технологическим и производственным потенциалом. Механизмы, заложенные в ТОСЭР, позволяют использовать имеющиеся ресурсы ЗАТО атомной отрасли, с одной стороны, и реализовывать градостроительный и социокультурный потенциал для устойчивого развития – с другой.

Стратегическое управление устойчивым развитием ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли способствует гармонизации процесса на всех уровнях управления, а также помогает обеспечить межведомственную согласованность. Использование развитой теоретической базы, стройного методологического аппарата и инструментов стратегического управления для обеспечения устойчивого развития ЗАТО атомной отрасли через механизмы ТОСЭР позволяет обеспечить не только результативность (способность добиваться поставленных целей в заданные сроки), но и эффективность (способность добиваться результата минимальными затратами ресурсов) процесса.

Заключение. Анализ теоретических основ стратегического управления ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли позволяет сделать вывод, что, несмотря на общую проработанность данного направления научного исследования, вопросы стратегического управления ТОСЭР как сложными социально-экономическими системами изучены недостаточно. Не рассмотрены вопросы стратегического управления ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли как уникального российского примера функционирования атомно-космических закрытых городов. Анализ теории и методических разработок в области стратегического управления свидетельствует о перспективности его применения для целей долгосрочного устойчивого развития ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли. Богатый инструментарий стратегического управления, гибкость подходов и достаточно развитая методологическая база позволяют гармонично вписать стратегию развития ТОСЭР в ЗАТО атомной отрасли в рамки федеральных, ведомственных, региональных и муниципальных стратегий социально-экономического развития, сохранив при этом отраслевую специфику и технологическую направленность конкретного ТОСЭР.

Библиографические ссылки

1. Трофимова Е. А. Особенности стратегического управления в мезоуровневых социально-экономических системах // Фундаментальные исследования. 2015. № 2, ч. 11. С. 2389–2393.

2. Cristensen C. R., Andrews K. R., Bower I. L. Business Policy: Text and Cases. Homewood (ill), Irwin. 1960.

3. Chandler A. D. Strategy and Structure: A. Chapter in the History of Industrial Enterprises. Cambridge, Mass, MIT. Press, 1962.

4. Минцберг Г., Альстрэнд Б., Лэмпел Д. Школы стратегий: Стратегическое сафари: экскурсия по дебрям стратегий менеджмента. СПб. : Питер, 2000. 336 с.

5. Ансофф И. Стратегическое управление. М. : Экономика, 1989.

6. Зуб А. Т. Стратегический менеджмент. Теория и практика. М. : Аспект Пресс, 2002.

7. Катькало В. С. Теория стратегического управления: этапы развития и основные парадигмы // Научные доклады центра управленческих и институциональных исследований факультета менеджмента СПбГУ. 2002. № 14.

8. Виханский О. С. Стратегическое управление. М. : Экономистъ, 2006. 293 с.

9. О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации : федер. закон Российской Федерации от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: http:/ rg.ru/2014/12/31/territorii-dok.html (дата обращения: 04.09.2017).

10. Глигич-Золоторёва М. В. Стратегия управления региональным развитием: мировые тенденции и отечественный опыт // Наука и образование: хозяйство и экономика [Электронный ресурс]. URL: http:// www.journal-nio.com/index.php?option=com_content& view=article&id=532&Itemid=91 (дата обращения: 29.09.2017).

11. Территории опережающего социально-экономического развития: вопросы теории и практики // Материалы I Всерос. науч.-практ. конф. (2 марта 2017, г. Казань). Казань : Познание, 2017. 310 с.

12. Аврамчикова Н. Т., Данильченко Ю. В., Пучкин М. Б. Проектное управление инновационной деятельностью в ТОСЭР // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 243–252.

13. Асланова С. Х., Топсахалова Ф. М.-Г. Стратегическое управление социально-экономическим развитием на региональном уровне // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-11. С. 2389–2393.

14. Официальный портал государственной корпорации «Росатом» [Электронный ресурс]. URL: http:// www.rosatom.ru/ (дата обращения: 29.09.2017).

15. Официальный сайт Администрации ЗАТО г. Железногорск Красноярского края [Электронный ресурс]. URL: http://www.admk26.ru/ (дата обращения: 29.09.2017).

16. Осипов В. С. Стратегическое значение территорий опережающего развития для экономики страны // Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Сер. 1. Экономика и управление. 2016. № 4 (19). С. 5–12.

References

1. Trofimova E. A. [Features of strategic management in the mezo-level social and economic systems]. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2015, Vol. 11, No. 2, P. 2389–2393 (In Russ.).

2. Cristensen C. R., Andrews K. R., Bower I. L. Business Policy: Text and Cases. Homewood (ill), Irwin., 1960, 341 p.

3. Chandler A. D. Strategy and Structure: A.Chapter in the History of Industrial Enterprises. – Cambridge, Mass, MIT. Press, 1962, 298 p.

4. Mintsberg G., Al'strend B., Lempel D. *Shkoly strategiy: Strategicheskoe safari: ekskursiya po debryam strategiy menedzhmenta.* [School strategies: Strategic Safari: a guided tour through the wilds of management strategies]. SPb, Piter Publ., 2000, 336 p.

5. Ansoff I. *Strategicheskoe upravlenie.* [Strategic management]. Moscow, Ekonomika Publ., 1989, 237 p.

6. Zub A. T. *Strategicheskiy menedzhment. Teoriya i praktika* [Strategic management: Theory and practice]. Moscow, Aspekt Press Publ., 2002 (In Russ.).

7. Kat'kalo V. S. [Theory of strategic management: stages of development and basic paradigms]. *Nauchnye doklady tsentra upravlencheskikh i institutsional'nykh issledovaniy fakul'teta menedzhmenta SPbGU*. 2002, No. 2002 (14) (In Russ.).

8. Vikhanskiy O. S. *Strategicheskoe upravlenie* [Strategic management]. Moscow, Ekonomist Publ., 2006, 293 p.

9. RF Federal Law dated "About territories of advancing socio-economic development in the Russian Federation" of December 29, 2014, No. 473-FZ (In Russ.). Available at: http:/rg.ru/2014/12/31/territorii-dok.html (accessed 04.09.2017).

10. Gligich-Zolotoreva M. V. [Strategy of management of regional development: global trends and domestic experience]. *Zhurnal Nauka i obrazovanie: khozyaystvo i ekonomika*. Available at: http://www.journal-nio.com/index.php?option=com_content&view=article&id=532&Itemid=91 (In Russ.) (accessed 29.09.2017).

11. [The territory of advancing socio-economic development: theory and practice]. *Materialy I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Kazan', Poznanie Publ., 2017, 310 p. (In Russ.).

12. Avramchikova N. T., Danil'chenko Yu. V., Puchkin M. B. [Project management of innovative activity in TOSER]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 243–252 (In Russ.).

13. Aslanova S. Kh., Topsakhalova F. M.-G. [Strategic management of socio-economic development at the regional level]. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2015, No. 2–11, P. 2389–2393 (In Russ.).

14. Official site of the state corporation ROSATOM (In Russ.) Available at: http://www.rosatom.ru/ (accessed 29.09.2017).

15. Official site of administration of ZATO Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region (In Russ.) Available at: http://www.admk26.ru (accessed 29.09.2017).

16. Osipov V. S. [The strategic importance of the priority development areas for the country's economy]. *Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S. Yu. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie.* 2016, Vol. 19, No. 4, P. 5–12 (In Russ.).

© Пучкин М. Б., 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абенова Жулдыз Саламатовна – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; инженер, АО «Национальная компания «Казахстан Гарыш Сапары». E-mail: zhuza44@mail.ru.

Агафонов Евгений Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: agafonov@gmx.de.

Амельченко Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Институт машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nikalam@mail.ru.

Ачкасова Евгения Андреевна – старший преподаватель кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: furmula@mail.ru.

Бабина Ольга Ивановна – старший преподаватель кафедры бизнес-информатики, Институт управления бизнес-процессов и экономики, Сибирский федеральный университет. E-mail: babina62@yandex.ru.

Бандеев Олег Евгеньевич – магистрант кафедры систем искусственного интеллекта, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: anna4u@list.ru.

Баранов Михаил Евгеньевич – кандидат биологических наук, доцент факультета военного обучения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: me_baranov@mail.ru.

Бойко Оксана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: bouko1962@yandex.ru.

Брезицкая Валерия Витальевна – младший научный сотрудник сектора НИОКР НИУ, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: bresizkajaW@rambler.ru.

Брестер Кристина Юрьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: christina.brester@gmail.com.

Бычек Анна Андреевна – магистрант, Сибирский федеральный университет. E-mail: annabychek@gmail.com.

Власов Антон Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vlasov.anton@gmail.com.

Волкова Марина Анатольевна – соискатель ученой степени кандидата экономических наук, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; консультант, министерство экономического развития и инвестиционной политики Красноярского края. E-mail: wolfmarius@mail.ru.

Вшивков Юрий Федорович – научный сотрудник, Институт математики, экономики и информатики, Иркутский государственный университет. E-mail: 1988ufv@mail.ru.

Высотин Максим Александрович – аспирант, Сибирский федеральный университет; младший научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского – обособленного подразделения федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». E-mail: visotin.maxim@gmail.com.

Герасимова Людмила Анатольевна – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии, факультет машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Lyu-Gerasimova@yandex.ru.

Гордиенко Евгений Сергеевич – аспирант, математик, АО «НПО им. С. А. Лавочкина». E-mail: gordienko.evgenyy@gmail.com.

Гусев Сергей Анатольевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. E-mail: sag@osmf.sscc.ru.

Денисов Максим Андреевич – студент, Сибирский федеральный университет. E-mail: max_denisov00@mail.ru.

Дубынин Павел Алексеевич – студент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pavel.dubynin@mail.ru.

Ереско Сергей Павлович – доктор технических наук, член-корреспондент Академии наук Высшей школы РФ; профессор, Институт машиноведения и мехатроники, кафедра основ конструирования машин, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ereskosp@mail.sibsau.ru.

Ереско Татьяна Трофимовна – доктор технических наук, доцент, Институт машиноведения и мехатроники, заведующий кафедрой основ конструирования машин, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ereskott@mail.ru.

Ермаков Дмитрий Владимирович – ведущий инженер-конструктор, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: info@polus-tomsk.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор кафедры финансов и кредита, Инженерно-экономический институт, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Золотарев Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: amida.2@yandex.ru.

Иванов Владимир Константинович – ведущий инженер, Московский технологический университет (МИРЭА). E-mail: ivanov_v@mirea.ru.

Иванов Илья Андреевич – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ilyaiv92@gmail.com.

Казанцев Захар Алексеевич – магистрант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: flexagon3@rambler.ru.

Калошин Иван Борисович – аспирант, Московский технологический университет (МИРЭА). E-mail: kaloshin@mirea.ru.

Киселев Геннадий Геннадьевич – кандидат педагогических наук, старший офицер отдела кадров Ракетных войск стратегического назначения. E-mail: kiselevGG2011@yandex.ru.

Клешнина Ирина Александровна – студент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail kleshnina.ira@gmail.com.

Ковалев Дмитрий Игоревич – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: grimm7jow@gmail.com.

Ковалев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Корнет Мария Евгеньевна – соискатель кафедры системного анализа и исследования операций, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: marya.kornet@gmail.com.

Краев Вячеслав Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail enggecin_mai@mail.ru.

Кривель Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора, Институт математики, экономики и информатики, Иркутский государственный университет. E-mail: krivel66@mail.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН; профессор кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кукушкин Евгений Владимирович – ассистент кафедры основ конструирования машин, Институт машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ironjeck@mail.ru.

Кушко Евгений Александрович – магистр кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Тел. +79509966004.

Латынцев Сергей Валерьевич – инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: lat.sv@mail.ru.

Левко Валерий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: levko@sibsau.ru.

Лосев Василий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: basilos@mail.ru.

Лубкова Татьяна Александровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: entalpi@mail.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: saor_medvedev@sibsau.ru.

Меновщиков Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основ конструирования машин, Институт машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: menovchikovva@mail.sibsau.ru.

Меус Сергей Владимирович – начальник сектора, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Тел. 8-3919-76-46-32.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Михов Евгений Дмитриевич – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: edmihov@mail.ru.

Морозов Егор Андреевич – лаборант, Институт биофизики СО РАН; аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: transserfer89@gmail.com.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой информационно-управляющих систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Николаев Владимир Николаевич – доктор технических наук, начальник отдела, Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина. E-mail: sibnia@sibnia.ru.

Овчинников Андрей Викторович – начальник отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Тел. 8-3919-76-52-09.

Орлова Анна Сергеевна – старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: annaorlova@sibsau.ru.

Павелко Сергей Владимирович – начальник группы отдела 307, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mrpawelko@iss-reshetnev.ru.

Панфилов Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail crook_80@mail.ru.

Панфилова Татьяна Александровна – лаборант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail crook_8000@mail.ru.

Паротькин Николай Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nyparotkin@yandex.ru.

Пасечник Кирилл Арнольдович – инженер, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pasechnik.kirill@gmail.com.

Пашковская Ольга Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pashkovskaya@sibsau.ru.

Петров Михаил Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mnp_kafaes@mail.ru.

Петросян Мариам Ониковна – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mopetrosyan@gmail.com.

Платов Илья Вячеславович – кандидат технических наук, инженер-конструктор, АО «НПО им. С. А. Лавочкина». E-mail: aia@laspace.ru.

Платонов Олег Александрович – полковник, начальник военной кафедры Ракетных войск стратегического назначения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: o.platonov@mail.ru.

Подвербных Ольга Ефимовна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики труда и управления персоналом; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: podverbnykholga@mail.ru.

Попов Захар Иванович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». E-mail: zipcool@bk.ru.

Пучкин Михаил Борисович – управляющий партнёр, консалтинговое агентство «MBP Consulting»; старший преподаватель кафедры менеджмента, аспирант кафедры финансов и кредита, Инженерно-экономический институт, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: poochkin@yandex.ru

Пятаева Анна Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры систем искусственного интеллекта, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: anna4u@list.ru.

Раскина Анастасия Владимировна – аспирант, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: raskina.1012@yandex.ru.

Решетникова Светлана Николаевна – кандидат технических наук, заведующий методическим кабинетом диссертационных советов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ambre2014650@yandex.ru.

Рогалев Александр Алексеевич – ассистент кафедры информационных систем, Сибирский федеральный университет. E-mail: a.rogalyov@yahoo.com.

Ручкин Леонид Владиленович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: leonid-ruchkin@yandex.ru.

Ручкина Надежда Леонидовна – старший преподаватель кафедры технической механики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: naleru@yandex.ru.

Савин Дмитрий Игоревич – аспирант кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 3608318@mail.ru.

Савостьянова Ирина Леонидовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ruppa@inbox.ru

Сарамуд Михаил Владимирович – инженер НИУ, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: msaramud@gmail.com.

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных экономических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

Сержантова Мария Викторовна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 2074213@gmail.com.

Симакова Анна Евгеньевна – аспирант кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: annasaklakova@mail.ru.

Симонов Александр Владимирович – кандидат технических наук, ведущий математик, АО «НПО им. С. А. Лавочкина». E-mail: alex.simonov@laspace.ru.

Скрипачев Владимир Олегович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Московский технологический университет (МИРЭА). E-mail: skripachev@mirea.ru.

Соловьев Василий Владимирович – начальник отдела, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: info@polus-tomsk.ru.

Сопов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail evgenysopov@gmail.com.

Сопов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Сопова Лидия Николаевна – лектор, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sopova.lidia@gmail.com.

Суровцева Ирина Вячеславовна – ведущий инженер, Московский технологический университет (МИРЭА). E-mail: surovceva@mirea.ru.

Тамбасов Игорь Анатольевич – научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского, Красноярский научный центр СО РАН. E-mail: tambasov_igor@mail.ru.

Тамбасова Екатерина Витальевна – аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; инженер отдела 307, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: K_Yozh@mail.ru, tambasovaev@iss-reshetnev.ru.

Титов Максим Андреевич – инженер, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: titov.rckas@gmail.com.

Тихомиров Александр Аполлинариевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией управления биосинтезом фототрофов, Институт биофизики СО РАН; заведующий кафедрой замкнутых экологических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Тихонов Алексей Иванович – кандидат технических наук, доцент, директор, Институт инженерной экономики и гуманитарных наук, заведующий кафедрой управления персоналом, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail enggecin_mai@mail.ru.

Токарев Алексей Валерьевич – начальник сектора отдела 307, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: aleksey@iss-reshetnev.ru.

Трифонов Сергей Викторович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биофизики СО РАН; старший преподаватель, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Харламов Александр Геннадьевич – магистрант, Московский технологический университет (МИРЭА). E-mail: harlamov_a@mirea.ru.

Хижняк Сергей Витальевич – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры экологии и естествознания, Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: Khizhnyak@yandex.ru.

Чепкасов Илья Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова. E-mail: ilya_chepkasov@mail.ru.

Чернова Светлана Сергеевна – студент, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: chsvetlanas@gmail.com.

Чжан Екатерина Анатольевна – старший преподаватель, Сибирский федеральный университет. E-mail: ekach@list.ru.

Шишкина Анастасия Васильевна – студент, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: nastya.shishkina9666@mail.ru.

Юферова Надежда Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nad.yuferowa@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abenova Zhuldyz Salamatovna – postgraduate student, Siberian University of Science and Technology; engineer, JSC "National Company "Kazakhstan Garysh Sapary''. E-mail: zhuza44@mail.ru.

Achkasova Evgenia Andreevna – senior teacher, Department of Aircrafts and Engines Technical Operation, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: furmula@mail.ru.

Agafonov Evgeny Dmitrievich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of System Analysis and Operation Research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: agafonov@gmx.de.

Amel'chenko Nikolay Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Mechanical Engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nikalam@mail.ru.

Babina Olga Ivanovna – senior teacher, Department of Business informatics, Institute of Business Management and Economics, Siberian Federal University. E-mail: babina62@yandex.ru.

Bandeev Oleg Evgenievich – student, Siberian Federal University. E-mail: anna4u@list.ru.

Baranov Mikhail Evgen'evich – Cand. Sc., Docent, faculty of Military training, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: me_baranov@mail.ru.

Brezitskaya Valeriya Vital'evna – junior researcher, division of NIOKR NIU, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: bresizkajaW@rambler.ru.

Boyko Oksana Gennadievna – Cand. Sc., Docent, Department of Aircrafts and Engines Technical Operation, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: bouko1962@yandex.ru.

Brester Christina Yurevna – Cand. Sc., senior teacher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: christina.brester@gmail.com.

Bychek Anna Andreevna – Master's degree student, Siberian Federal University. E-mail: annabychek@gmail.com.

Chepkasov Ilya Vasilevich – Cand. Sc., Docent of Katanov Khakas State University. E-mail: ilya_chepkasov@mail.ru.

Chernova Svetlana Sergeevna – student, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: chsvetlanas@gmail.com.

Chzhan Ekaterina Anatol'evna – senior teacher, Siberian Federal University. E-mail: ekach@list.ru.

Denisov Maksim Andreevich – student, Siberian Federal University. E-mail: max_denisov00@mail.ru.

Dubynin Pavel Alekseevich – student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pavel.dubynin@mail.ru.

Eresko Sergey Pavlovich – Dr. Sc., corresponding member of the Academy of Science of the Higher education institutions RF, professor, Institute of Mechanical Science and Mechatronics, Department of Principle of machine construction, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology**.** E-mail: ereskosp@mail.sibsau.ru.

Eresko Tatyana Trofimovna – Dr. Sc., Docent, Institute of Mechanical Science and Mechatronics, Head of Department of Principle of machine construction, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ereskott@mail.ru.

Ermakov Dmitriy Vladimirovich – lead engineer designer, JSC "Scientific and Industrial centre "Polyus". E-mail: info@polus-tomsk.ru.

Erygin Yuri Vladimirovich – Dr. Sc., professor, Department of Finance and Credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Gerasimova Ludmila Anatol'evna – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Environmental Engineering, faculty of Mechanical engineering and mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: Lyu-Gerasimova@yandex.ru.

Gordienko Evgeny Sergeevich – postgraduate student, mathematician, Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin. E-mail: gordienko.evgenyy@gmail.com.

Gusev Sergey Anatolyevich – Dr. Sc., Senior Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS. E-mail: sag@osmf.sscc.ru.

Ivanov Ilya Andreevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ilyaiv92@gmail.com.

Ivanov Vladimir Konstantinovich – leading engineer, Moscow Technological University (MIREA). E-mail: ivanov_v@mirea.ru.

Kaloshin Ivan Borisovich – postgraduate student, Moscow Technological University (MIREA). E-mail: kaloshin@mirea.ru.

Kazantsev Zakhar Alekseevich – student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: flexagon3@rambler.ru.

Kharlamov Alexander Gennadievich – Master's Degree student, Moscow Technological University (MIREA). E-mail: harlamov_a@mirea.ru.

Khizhnyak Sergei Vital'evich – Dr. Sc., Docent, professor of Department of Ecology and natural sciences, Krrasnoyarsk State Agrarian University. E-mail: Khizhnyak @yandex.ru.

Kiselev Gennady Gennadyevich – Cand. Sc., senior officer of the staff of the strategic Missile forces. E-mail: kiselevGG2011@yandex.ru.

Kleshnina Irina Alexandrovna – student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail kleshnina.ira@gmail.com.

Kornet Marya Evgenevna – applicant of Department of System and operation analysis, Institute of Informatics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: marya.kornet@gmail.com.

Kovalev Dmitriy Igorevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: grimm7jow@gmail.com

Kovalev Igor Vladimirovich – Dr. Sc., Professor of System analysis department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru

Kraev Vyacheslav Michailovich – Dr. Sc., Docent, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: enggecin_mai@mail.ru.

Krivel Sergey Mikhaylovich – Cand. Sc., Docent, Deputy Director of the Institute of Mathematics, Economics and Informatics, Irkutsk State University. E-mail: krivel66@mail.ru.

Krushenko Genry Gavrilovich – Dr. Sc., professor, chief research officer, Institute of Computational Modeling SB RAS; professor of Department of Aircraft engines, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kukushkin Evgeny Vladimirovich – assistant of Department of Principle of machine construction, Institute of Mechanical Science and Mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ironjeck@mail.ru.

Kushko Evgeny Alexandrovich – Master's Degree student, Department of Information technology security, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

Latyntsev Sergey Valerievich – engineer, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: lat.sv@mail.ru.

Levko Valery Anatolyevich – Dr. Sc., Docent, Professor of Department of Machine Building Technology, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: levko@sibsau.ru.

Losev Vasiliy Vladimirovich – Cand. Sc., Docent, Department of Automation of production processes, Institute of Informatics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: basilos@mail.ru.

Lubkova Tatiana Alexandrovna – Cand. Sc., researcher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: entalpi@mail.ru.

Medvedev Alexander Vasilyevich – Dr. Sc., professor of Department of System Analysis and Operations Research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: saor_medvedev@sibsau.ru.

Menovschikov Vladimir Alexandrovich – Dr. Sc., professor of Department of Principle of machine construction, Institute of Mechanical Science and Mechatronics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: menovchikovva@mail.sibsau.ru.

Meus Sergey Vladimirovich – head of section, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems".

Miheev Anatolii Egorovich – Dr. Sc., Professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

Mihov Evgeniy Dmitrievich – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: edmihov@mail.ru.

Morozov Yegor Andreevich – laboratory technician, Institute of Biophysics SB RAS; postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: transserfer89@gmail.com.

Murygin Alexander Vladimirovich – D. Sc., professor, Head of Department of Information and Management Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.

Nikolaev Vladimir Nikolaevich – Dr. Sc., Head of Department, S. A. Chaplygin Siberian Aeronautical Research Institute. E-mail: sibnia@sibnia.ru.

Orlova Anna Sergeevna – senior teacher, Department of Informatics and Computer Engineering, Institute of Informatics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: annaorlova@sibsau.ru.

Ovchinnikov Andrey Viktorovich – head of department, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems".

Panfilov Ilia Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail crook_80@mail.ru.

Panfilova Tatyana Aleksandrovna – laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail crook_8000@mail.ru.

Parot`kin Nikolai Yurievich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nyparotkin@yandex.ru.

Pasechnik Kirill Arnol'dovich – engineer, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pasechnik.kirill@gmail.com.

Pashkovskaya Olga Vladimirovna – Cand. Sc., Docent, Department of Economic information systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pashkovskaya@sibsau.ru.

Pavelko Sergey Vladimirovich – a chief of department group 307, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: mrpawelko@iss-reshetnev.ru.

Petrosyan Mariam Onikovna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mopetrosyan@gmail.com.

Petrov Mikhail Nikolayevich – Dr. Sc., Head of Department of Electronic Engineering and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mnp_kafaes@mail.ru.

Platonov Oleg Alexandrovich – Colonel, head of Military Department of the strategic Missile forces, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: o.platonov@mail.ru.

Platov Ilya Vyacheslavovich – Cand. Sc., engineer-designer, Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin. E-mail: aia@laspace.ru.

Podverbnykh Olga Yefimovna – Dr. Sc., professor, head of Department of Labour Economics and Human Capital Management, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail podverbnykholga@mail.ru.

Poochkin Mikhail Borisovich – executive partner of consulting agency "MBP Consulting"; senior teacher department of management, postgraduate student of Department of Finance and credit, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: poochkin@yandex.ru.

Popov Zakhar Ivanovich – Cand. Sc., researcher, National University of Science and Technology "MISiS". E-mail: zipcool@bk.ru.

Pyataeva Anna Vladimirovna – Cand. Sc., Docent, Institute of Space and Information Techologies, Siberian Federal University. E-mail: anna4u@list.ru

Raskina Anastasia Vladimirovna – postgraduate student, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: raskina.1012@yandex.ru.

Reshetnikova Svetlana Nikolaevna – Cand. Sc., head of the methodical study of dissertation councils, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ambre2014650@yandex.ru.

Rogalev Alexander Alekseevich – assistant of Department of Information Systems, Siberian Federal University. E-mail: a.rogalyov@yahoo.com.

Ruchkin Leonid Vladilenovich – Cand. Sc., Docent, Head of Department of Machine Building Technology, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: leonid-ruchkin@yandex.ru.

Ruchkina Nadezhda Leonidovna – senior teacher, Department of Technical Mechanics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: naleru@yandex.ru.

Saramud Mikhail Vladimirovich – engineer of the office of scientific research, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: msaramud@gmail.com

Savin Dmitry Igorevich – postgraduate student, Department of Machine Building Technology, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 3608318@mail.ru.

Savostyanova Irina Leonidovna – Cand. Sc., Department of Economic Information Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ruppa@inbox.ru.

Senashov Sergei Ivanovich – Dr. Sc, professor, Head of Department of Economic Information Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sen@sibsau.ru.

Serzhantova Mariia Viktorovna – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 2074213@gmail.com.

Shishkina Anastasia Vasiljevna – student of Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: nastya.shishkina9666@mail.ru.

Simakova Anna Evgenevna – postgraduate student, Department of Machine Building Technology, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: annasaklakova@mail.ru.

Simonov Alexander Vladimorovich – Cand. Sc., leading mathematician, Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin. E-mail: alex.simonov@laspace.ru.

Skripachev Vladimir Olegovich – Cand. Sc., leading researcher, Moscow Technological University (MIREA). E-mail: skripachev@mirea.ru.

Solovev Vasilii Vladimirovich – head of department, JSC "Scientific and Industrial centre "Polyus". E-mail: info@polus-tomsk.ru.

Sopov Evgeny Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail evgenysopov@gmail.com.

Sopova Lidia Nikolaevna – lecturer, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sopova.lidia@gmail.com.

Surovceva Irina Vyacheslavovna – lead engineer, Moscow Technological University (MIREA). E-mail: surovceva@mirea.ru.

Tambasov Igor Anatolievich – scientific researcher, Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: tambasov_igor@mail.ru.

Tambasova Ekaterina Vitalievna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; engineer of department 307, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: K_Yozh@mail.ru, tambasovaev@iss-reshetnev.ru.

Tikhomirov Alexander Apollinarievich – D. Sc., professor, Head of laboratory of Phototrophic Biosynthesis Control, Institute of Biophysics SB RAS; had of Department of Closed EcoSystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Tikhonov Aleksei Ivanovich – Cand. Sc., Docent, director of the Institute of Engineering Economy and Humanities, head of Department of Human Capital Management, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail enggecin_mai@mail.ru.

Titov Maksim Andreevich – engineer, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: titov.rckas@gmail.com.

Tokarev Aleksey Valerievich – chief of department sector 307, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: aleksey@iss-reshetnev.ru.

Trifonov Sergei Viktorovich – Cand. Sc., senior researcher, Institute of Biophysics SB RAS; senior teacher, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Visotin Maxim Aleksandrovich – postgraduate student, Siberian Federal University; research assistant, Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: visotin.maxim@gmail.com.

Vlasov Anton Yur’evich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: vlasov.anton@gmail.com.

Volkova Marina Anatolevna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; consultant of the Ministry of economic development and investment policy of the Krasnoyarsk kray. E-mail: wolfmarius@mail.ru.

Vshivkov Juriy Fedorovich – researcher of Institute of Mathematics, Economics and Informatics, Irkutsk State University. E-mail: 1988ufv@mail.ru.

Yuferova Nadejda Yuryevna – Cand. Sc., Docent, Department of Economic Information Systems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nad.yuferowa@yandex.ru.

Zolotarev Vyacheslav Vladimirovich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: amida.2@yandex.ru.