ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Том 16, № 1

Красноярск 2015

ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева (Вестник СибГАУ)

Том 16, № 1

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

Ответственный секретарь
Зеленков Павел Викторович, кандидат технических наук

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
Ловчиков А. Н., 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)
Младенов Г., член-корреспондент Болгарской академии наук, доктор физических наук, профессор (София, Болгария)
Павера Р., доцент (Братислава, Словакия)
Семенкин Е. С., доктор технических наук, профессор (Красноярск)
Тестоедов Н. А., член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор (Железногорск)
Ужуле К., доктор (Рига, Латвия)
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)

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2015

VESTNIK

Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta
imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)

Vol. 16, No. 1

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

Executive Secretary
Zelenkov P. V., Cand.Sc.

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
Lovchikov A. N., 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)
Mladenov G., Corresponding Member of Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Sofia, Bulgaria)
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)
Užule K., Ph.D. (Riga, Latvia)
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)

© Siberian State Aerospace University
named after academician M. F. Reshetnev, 2015

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник СибГАУ» является периодическим печатным научным рецензируемым журналом. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ–ФС77-22189 от 27.10.2005 г. ISSN 1816-9724. Подписные индексы в каталогах «Роспечать» – 11399; «Пресса России» – 39263.

Входит в перечень журналов ВАК.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

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

Выпускается с 2000 года. До 2002 года носил название «Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева» («Вестник САА»).

Журнал публикует результаты научных исследований в области естественных, технических и прикладных наук по вопросам:

– проектирования, производства и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники;
– космического машиностроения;
– управления, вычислительной техники, информатики аэрокосмической отрасли;
– отраслевой экономики.

Каждый выпуск 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. Специальный выпуск – 1 раз 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 «Вестник СибГАУ» ссылка обязательна.

Учредитель
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева,
Российская Федерация, 660014, 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

Vestnik SibGAU is a periodical printed 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.

Vestnik SibGAU is the official periodical of Siberian State Aerospace University (SibSAU)

The journal holds a Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate (Cyrillic): PI No. FC 77-22189, dated 27 October 2005.

The Journal is included in the following subscription catalogues:
1. 11399 – Rospechat'
2. 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*).

Vestnik SibGAU is a scientific journal which reviews and publishes results of research in the field of natural and applied sciences and engineering. The main topics of the journal are:

– design, production, and operation of aircraft and spacecraft;
– aerospace engineering;
– management, computer technology, applied informatics in the aerospace industry;
– applied economics.

Each issue consists of four parts:

Part 1. Mathematics, Mechanics, Computer Science.
Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.
Part 3. Technological Processes and Materials.
Part 4. Economics.

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

There are four issues every year with an additional special issue, which is published once a year.

An online version of *Vestnik SibGAU* can been viewed at http://www.elibrary.ru

Vestnik SiGAU should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

CONTACTS: *Vestnik SibGAU* website: www.vestnik.sibsau.ru

Address: Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., 660014, Krasnoyarsk, Russia
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 30.03.2015. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 32,8.
Уч.-изд. л. 39,6. Тираж 1000 экз. Заказ 87/224. С 50/15.
Редакционно-издательский отдел
Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660014, г. Красноярск,
просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
Отпечатано в типографии ИП Михайловой И. Г.
660125, г. Красноярск, ул. Водопьянова, 6в-69

Editor O. A. Plekhova
Editor (*English Language*) S. G. Efa
Layout original O. V. Bulatnikova
Signed (for printing): 30.03.2015. Format 70×108/16.
Offset Paper. Print flat. 32,8. Published sheets 39,6.
1000 copies. Order 87/224. C 50/15.
Printing and Publication Department
Siberian State Aerospace University
660014, Krasnoyarsk,
31, Krasnoyarsky Rabochy Av.,
Printed in the printing house of I.G. Mikhailova
660125, Krasnoyarsk, 6в-69, Vodopyanova Str.

СОДЕРЖАНИЕ

Ковалев И. В. От завода-втуза к современному аэрокосмическому университету 9

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Антамошкин А. Н., Масич И. С. Обнаружение закономерностей в данных для распознавания объектов как задача условной псевдобулевой оптимизации 16

Ахмедова Ш. А., Семенкин Е. С. Проектирование коллективов машин опорных векторов кооперативным бионическим алгоритмом для решения задач классификации 22

Брестер К. Ю., Семенкина О. Э., Сидоров М. Ю. Робастные и надежные подходы к распознаванию эмоций по речи 28

Вавилов Д. В., Лукин Р. С., Усаков В. И. Методика проектирования зубчатых передач механизмов приводов различного назначения 35

Деев П. О., Лопатин А. В. Определение основной частоты колебаний трехслойной пластины, шарнирно закрепленной в четырех углах 41

Додорин И. С., Смирнов Н. А. Методика прецизионной настройки антенн космического аппарата 46

Коблов Н. Н., Черватюк В. Д. Перспективы взаимодействия предприятий Роскосмоса при работе с электронной технической документацией 52

Коплярова Н. В., Медведев А. В. Непараметрические алгоритмы управления системами класса Гаммерштейна 62

Корнеева А. А., Корнет М. Е., Сергеева Н. А., Чжан Е. А. Об адаптивном управлении последовательностью технологических объектов 72

Коромыслова А. А., Семенкина М. Е. Об эффективности эволюционных алгоритмов многокритериального проектирования искусственных нейронных сетей 79

Кузнецов П. А. Зависимые отказы в многофункциональных автоматизированных системах управления 86

Курносов А. С., Фатеев Ю. Л. Моделирование одночастотного метода определения вертикальной задержки сигнала в ионосфере 91

Нагорный В. О., Аристов А. В. Асинхронный электропривод антенны радиолокатора секторного обзора в режиме пульсирующего движения 97

Рогалев А. Н., Рогалев А. А. Численные оценки предельных отклонений траекторий летательных аппаратов в атмосфере 104

Семенкина М. Е. Гибридизация локального спуска с самоконфигурируемым алгоритмом генетического программирования для автоматического генерирования нечетких классификаторов 113

Сергиенко Р. Б., Шан Ур Реман М., Хан А. Э., Гасанова Т. О., Минкер В. Отбор признаков для классификации текстов на основе ограничений для весов термов 119

Сопов Е. А. Самоконфигурируемый генетический алгоритм на базе множества стратегий поиска в нестационарной среде 124

Становов В. В., Семенкина О. Э. Самоконфигурируемый гибридный эволюционный алгоритм для задач с несбалансированными данными и множеством классов 131

Хритоненко Д. И., Семенкин Е. С., Сугак Е. В., Потылицына Е. Н. Решение задачи прогнозирования экологического состояния города нейроэволюционными алгоритмами 137

Чимитова Е. В. Построение вероятностных моделей надежности по выборкам текущих состояний 143

Шкраба А., Кофьяч Д., Жнидаршич А., Розман Ч., Малетич М. Применение конечных автоматов с генетическими алгоритмами в JavaScript для определения управления человеческими ресурсами 153

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Апасов В. И., Михальченко С. Г. Бифуркационный анализ комбинированного преобразователя при изменении емкости выходного фильтра 160

Баландина Т. Н., Баландин Е. А. Электромеханический исполнительный орган на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на дисковом статоре для малого космического аппарата 166

Васенина А. А., Сидоренко К. А. Применение спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS при адаптации ионосферной модели 172
Васильцов А. А., Липовцев А. А. Амортизатор для исполнительных органов системы стабилизации космического аппарата 177
Космынина Н. А. Метод автоматизации подготовки типовых работ по управлению космическими аппаратами 183
Логинов Ю. Ю., Брильков А. В., Мозжерин А. В. Влияние сопротивления лицевого слоя солнечного элемента на выходные характеристики устройства 188
Мошняков А. А., Михайлов М. В. Электропитание нагревательных элементов двигательной установки стабилизированным переменным током 193
Платов И. В., Симонов А. В., Константинов М. С. Особенности разработки комбинированной двигательной установки и схемы полёта космического аппарата «Интергелио-Зонд» 198
Удалов Д. В. Бортовая микропроцессорная система управления с повышенной сбоеустойчивостью 207
Щербаков С. А., Игнатовский В. В., Филонова С. Ю. Модуль мультиплексного канала информационного обмена 214

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Жигалов В. С., Мягков В. Г., Рыбакова А. Н., Турпанов И. А., Бондаренко Г. Н. Структурные и магнитные свойства CoPt(111) пленок, полученных с помощью твердофазных реакций 226
Крушенко Г. Г., Назаров В. П., Резанова М. В. Применение нанопорошковых технологий при изготовлении из алюминиевых сплавов деталей транспортных средств 233
Шиманский А. Ф., Подкопаев О. И., Копыткова С. А., Балакчина Е. С., Кравцова Е. Д. Определение содержания германия в лигнитах Нижнего Приангарья 241

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Бревнов В. Г., Ерыгина Л. В. Типология инновационных проектов на предприятиях оборонно-промышленного комплекса 248
Латышенок Д. К. Современное состояние оборонно-промышленного комплекса России 253
Подвербных У. С. Типология компетенции рабочих кадров предприятий аэрокосмической отрасли 261
Фирулев О. В., Ерыгин Ю. В. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы»: первые результаты 268

Сведения об авторах 276

CONTENTS

Kovalev I. V. From a plant and technical college to the modern aerospace university 9

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Antamoshkin A. N., Masich I. S. Detection of patterns in data for recognition of objects as a conditional pseudo-boolean optimization problem 16

Akhmedova Sh. A., Semenkin E. S. SVM-based classifier ensembles design with Co-Operative biology inspired algorithm 22

Brester Ch. Yu., Semenkina O. E., Sidorov M. Yu. Robust and reliable techniques for speech-based emotion recognition 28

Vavilov D. V., Lukin R. S., Usakov V. I. Method of designing gear drive mechanism of different purpose 35

Deev P. O., Lopatin A. V. Fundamental frequency determination for sandwich plate simply supported in four corners 41

Dodorin I. S., Smirnov N. A. Methodology of precision adjustment of satellite antennas 46

Koblov N. N., Chervatyuk V. D. Prospects of cooperation between the enterprises of Roscosmos when working with electronic technical documentation 52

Koplyarova N. V., Medvedev A. V. Nonparametric algorithms of Hammerstein system control 62

Korneeva A. A., Kornet M. E., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. About adaptive control of sequence of technological objects 72

Koromyslova A. A., Semenkina M. E. About the effectiveness of evolutionary algorithms for multicriterial design of artificial neural networks 79

Kuznetsov P. A. Dependent failures in multifunctional ACS 86

Kurnosov A. S., Fateev Y. L. Single-frequency method simulation for determination of vertical ionospheric signal delay 91

Nagorniy V. O., Aristov A. V. Controlling two-phase asynchronous drive of radar antenna of sector review in pulsating motion mode 97

Rogalyov A. N., Rogalyov A. A. Numerical estimations of maximum deviations for aircraft trajectories in the atmosphere 104

Semenkina M. E. Hybridization of local search with self-configuring genetic programming algorithm for automated fuzzy classifier design 113

Sergienko R. B., Shan Ur Rehman M., Khan A. E., Gasanova T. O., Minker W. Features selection for text classification based on constraints for term weights 119

Sopov E. A. Self-configuring multi-strategy genetic algorithm for non-stationary environments 124

Stanovov V. V., Semenkina O. E. Self-configuring hybrid evolutionary algorithm for multi-class unbalanced datasets 131

Khritonenko D. I., Semenkin E. S., Sugak E. V., Potilitsina E. N. Solving the problem of city ecology forecasting with neuro-evolutionary algorithms 137

Chimitova E. V. The construction of probabilistic reliability models on the basis of current status data 143

Škraba A., Kofjač D., Žnidaršič A., Rozman Č., Maletič M. Application of finite automata with genetic algorithms in JavaScript for determination of manpower system control 153

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Apasov V. I., Mikhalchenko S. G. Bifurcation analysis of the combined converter at change of capacity of the output filter 160

Balandina T. N., Balandin E. A. An electromechanical executive body based on the contactless direct current motor with a winding printing disk stator for small spacecrafts 166

Vasenina A. A., Sidorenko K. A. Application of satellite systems GLONASS/GPS at adaptation ionospheric model 172

Vasiltsov A. A., Lipovtsev A. A. The shock-absorber for executive powers of system of stabilisation of a spacecraft 177

Kosmynina N. A. Automation method of satellite control scripts creation 183

Loginov Y. Y., Brilikov A. V., Mozherin A. V. The influence of surface layer resistance on output characteristics of solar cells 188

Moshnyakov A. A., Mikhaylov M. V. Electric power supply of heater elements of electric propulsion thruster by regulated alternating current 193

Platov I. V., Simonov A. V., Konstantinov M. S. Features of development of the combined impellent installation and the circuit of flight of the spacecraft “INTERGELIO-PROBE” 198
Udalov D. V. Satellite-borne microprocessor control system with improve upset tolerance 207
Shcherbakov S. A., Ignatovskiy V. V., Filonova S. Yu. Information interchange multiplex channel module 214

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Zhigalov V. S., Myagkov V. G., Rybakova A. N., Turpanov I. A., Bondarenko G. N. Structural and magnetic properties of CoPt(111) films obtained by using solid-phase reactions 226
Krushenko G. G., Nazarov V. P., Rezanova M. V. The use of the nanopowder technology in the manufacture of aluminum alloys parts vehicles 233
Shimanskiy A. F., Podkopaev O. I., Kopytkova S. A., Balakchina E. S., Kravtsova E. D. The germanium concentration determination in lignite of lower Angara region 241

PART 4. ECONOMICS

Brevnov V. G., Erygina L. V. Typology of innovative projects at the defense industry enterprises 248
Latyshenok D. K. Current state of the military-industrial complex of Russia 253
Podverbnikh U. S. Competences typology for aerospace enterprise workers 261
Firulev O. V., Erygin Y. V. Federal target program “Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020”: the first results 268

Information about the authors 280

ОТ ЗАВОДА-ВТУЗА К СОВРЕМЕННОМУ АЭРОКОСМИЧЕСКОМУ УНИВЕРСИТЕТУ

В 2015 г. Сибирскому государственному аэрокосмическому университету имени академика М. Ф. Решетнева исполняется 55 лет. СибГАУ – единственный аэрокосмический вуз в Сибирском и Дальневосточном регионах России – был создан в конце 1959 г. постановлением Правительства СССР с целью подготовки специалистов для ракетно-космической отрасли страны как завод-втуз при Красноярском машиностроительном заводе. Вся история СибГАУ неразрывно связана с созданием в Красноярском крае крупного ракетно-космического комплекса, решающего важнейшие задачи обороноспособности страны и освоения космического пространства. За время своего развития вуз прошел путь от завода-втуза до современного аэрокосмического университета.

Красноярск является одним из ведущих центров ракетно-космической отрасли страны, сибирским центром отечественного спутникостроения, где разрабатывается и изготавливается более 70 % отечественных космических аппаратов, а расположенные здесь АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева», ОАО «НПП «Радиосвязь», ОАО «ЦКБ «Геофизика», АО «Красмаш» совместно с СибГАУ являются ведущими центрами в области создания космических систем оборонного и народнохозяйственного назначения. Сохраняя лучшие традиции отечественного аэрокосмического образования в сочетании с интегрированной системой подготовки специалистов и инновационными образовательными технологиями, университет совместно с базовыми предприятиями сформировал единый учебно-научно-производственный комплекс.

За годы работы университетом подготовлено более 30 тыс. специалистов в области ракетно-космической техники и в других направлениях высокотехнологичного производства. Свыше 60 % инженерно-технического, научного и руководящего персонала АО «ИСС» и АО «Красмаш» являются выпускниками университета.

В настоящее время в университете обучаются 10,5 тыс. студентов. Учебный процесс обеспечивают 120 докторов наук, профессоров, 385 кандидатов наук, доцентов. В образовательном процессе участвуют аэрокосмический колледж, 5 институтов (космической техники; космических исследований и высоких технологий; информатики и телекоммуникаций; институт непрерывного образования; военный институт), 6 факультетов, 49 кафедр, комплекс научно-образовательных структур. Для целенаправленного формирования контингента будущих абитуриентов вуза и отбора талантливой молодежи в университете создана система довузовской подготовки (центр профориентации и довузовской подготовки; центр тестирования; аэрокосмическая и физико-математическая школы). Университет имеет развитую спортивную и социальную сферу, включающую несколько спортивных залов, стадион с футбольным полем и освещенным хоккейным кортом, Дворец водного спорта с тремя плавательными бассейнами, студенческий Дворец культуры, три общежития, базу отдыха, спортивно-оздоровительный лагерь.

Стратегической *миссией университета* является содействие динамичному развитию и повышению конкурентоспособности космической отрасли России на мировом рынке космических услуг, укреплению обороноспособности страны через опережающее кадровое и научно-инновационное обеспечение создания нового поколения космических аппаратов и систем.

Обучение в СибГАУ осуществляется по 10 специальностям СПО, 75 программам высшего и высшего профессионального образования, 30 программам аспирантуры. Из них 28 программ ВПО и 25 специальностей аспирантуры соответствуют направлениям космической отрасли.

Университет входит в число вузов, осуществляющих подготовку специалистов и научных кадров по государственному оборонному заказу. На начало 2015 г. в университете осуществляется целевая подготовка свыше 600 человек для предприятий ОПК.

В университете ведется подготовка офицеров запаса и кадровых военных для ракетных войск стратегического назначения. Осуществлены первые выпуски кадровых офицеров.

В последние годы значительно расширилась подготовка в магистратуре. В настоящее время открыто 55 магистерских программ по 22 направлениям. Прием в магистратуру в текущем году превысил 350 человек. Выпуск магистратуры достиг 250 человек. Начата подготовка магистров по заочной форме обучения.

В аспирантуре университета обучается около 300 человек, в том числе более 60 работников базовых предприятий. На базе университета действуют 5 докторских диссертационных советов. В докторантуре обучается около 20 человек по 5 научным специальностям. В 2014 г. аспирантами университета получены: стипендия Правительства РФ, премия Главы города Красноярска, 8 стипендий Президента РФ и Правительства РФ по приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики. Пять аспирантов и пять докторантов получили государственные премии Красноярского края в области профессионального образования.

В университете создана система поддержки молодых кандидатов и докторов наук, которые получают персональные надбавки после защиты диссертации в течение трех лет. Оказывается финансовая поддержка научным школам. Издается журнал «Вестник СибГАУ», включенный в список научных журналов, утвержденных ВАК России, опубликование в котором засчитывается при защите кандидатских и докторских диссертаций.

Динамичное развитие вуза и повышение качества подготовки специалистов обеспечивается постоянным совершенствованием учебного процесса, внедрением современных образовательных технологий, развитием фундаментальных и прикладных научных исследований и их использованием в образовательной деятельности. Активное внедрение в учебный процесс компетентностного подхода, использование кредитно-модульной системы обучения на всех специальностях и направлениях подготовки, предоставление студентам возможности выбора спецкурсов повысило их заинтересованность в изучении дисциплин, стимулировало систематическую учебную деятельность, сократило отсев и существенно улучшило качество подготовки специалистов.

В университете успешно продолжается реализация программы усиленной языковой подготовки обучающихся и научно-педагогических работников. Английский язык введен в качестве обязательного, желающим предоставлены условия для изучения двух иностранных языков. Ежегодно на дополнительных программах повышения языковой подготовки обучается свыше 500 человек, более 100 человек сдают в университетских авторизованных центрах сертификационные международные экзамены. Результатом такой деятельности является повышение публикационной активности ученых и преподавателей в научных журналах, индексируемых в международных

базах данных, рост международной академической мобильности. Свободное владение профессиональным английским значительно повысило востребованность выпускников СибГАУ со стороны работодателей.

Отличительной особенностью реализуемого в университете аэрокосмического образования является интегрированная подготовка специалистов, известная в стране как система «завод-втуз», «физтех», основанная на сочетании теоретического обучения с производственной работой на наукоемких базовых предприятиях космической отрасли либо научной работой в академических учреждениях, что отражено в учебных планах соответствующих специальностей. Базовыми предприятиями совместно с университетом разработана и эффективно действует система закрепления кадров, благодаря которой более 80 % выпускников ракетно-космических специальностей остаются работать на предприятиях отрасли.

Научные исследования в СибГАУ ориентированы, прежде всего, на решение проблем ракетно-космической отрасли. Тематика, решаемые научно-технические проблемы, направления и специальности подготовки кадров, включаемые в перспективные направления развития университета, обосновываются задачами, определенными Федеральной космической программой, задачами, возложенными на предприятия космической отрасли, а также сложившимися в вузе научными школами и направлениями научных исследований, созданной университетом совместно со стратегическими партнерами инфраструктурой инновационной и научно-образовательной деятельности.

Базовой научной школой СибГАУ в области космических систем является созданная в 1960–1970 гг. научная школа академика М. Ф. Решетнева – генерального конструктора космических систем (в период 1959–1996 гг.). Все последующие годы научная школа академика М. Ф. Решетнева развивалась, формируя новые научные направления создания космических систем, которые постепенно выделились в самостоятельные научные школы. Сейчас в вузе работают известные в стране и за рубежом научно-педагогические школы в следующих областях: развитие информационных спутниковых систем; разработка алгоритмического и программного обеспечения управления КА; космический мониторинг и дистанционное зондирование Земли; проектирование систем энергообеспечения космических аппаратов и интегрированных бортовых комплексов управления КА; моделирование, проектирование и испытание энергетических контуров, двигательных установок и систем терморегулирования КА; исследования и разработка устройств наноэлектроники; физика многофункциональных наноструктурированных материалов РКТ; космическое материаловедение; системный анализ, разработка автоматизированных систем управления КА; автоматизация электронно-лучевых технологий; экономика и организация предприятий ракетно-космической отрасли и интегрированных структур и ряд других.

Важнейшим элементом принятой в вузе системы подготовки специалистов является интеграция университета с институтами РАН. Соглашение о стратегическом партнерстве, заключенное СибГАУ с Красноярским научным центром СО РАН (КНЦ СО РАН), позволило на качественно новом уровне создать систему совместной научной и образовательной деятельности, привлекая потенциалы академических институтов КНЦ СО РАН и Института физики полупроводников СО РАН (Новосибирск), на базе которых созданы научно-образовательные подразделения университета.

Особое место в деятельности университета занимают совместно созданные с базовыми предприятиями и институтами РАН научно-образовательные центры: «Институт космических исследований и высоких технологий» (НОЦ «ИКИВТ»), «Космические системы и технологии» (НОЦ «КСТ»), «Замкнутые космические системы» (НОЦ «ЗКС»), «Управление космическими системами» (НОЦ «УКС») и «Ракетно-космические технологии» (НОЦ «РКТ»).

Научно-образовательные центры созданы и действуют в интересах развития космической отрасли по согласованию с Роскосмосом и РАН.

В области ракетно-космической составляющей вуза инновационная деятельность ведется по трем крупным приоритетным направлениям развития:

– космические информационные системы;
– замкнутые обитаемые космические системы;
– производство ракетно-космической техники.

Космические информационные системы – основное приоритетное направление, по которому университет занимает лидирующие позиции в РФ в подготовке кадров и в области исследований, связанных с разработкой и модернизацией отечественных космических информационных систем, совершенствованием космических аппаратов (КА), систем и комплексов различного назначения: фиксированная и мобильная связь, телевещание, навигация, геодезия, ретрансляция. В университете проводятся прикладные исследо-

вания, проектирование и разработка перспективных платформ автоматических КА оборонного и гражданского назначения, малых космических аппаратов, систем управления КА на орбите, методов использования космических информационных систем.

В рамках направления «Замкнутые обитаемые космические системы» проводятся исследования и разработки биорегенеративных систем жизнеобеспечения, оборудования и методов создания замкнутых систем, разработки по обеспечению надежности и безопасности замкнутых космических систем. Проблема создания безопасных биолого-технических систем с высокой степенью замкнутости массообменных процессов является одной из ключевых в освоении космического пространства, в реализации которого на среднесрочную перспективу представляется высадка человека на Луну и Марс.

По направлению «Производство ракетно-космической техники» проводятся фундаментальные и прикладные исследования в области разработки новых материалов и покрытий для ракетно-космической техники (РКТ), высоких технологий и оборудования, контроля и испытаний РКТ, организации производства и управления созданием РКТ.

Научные коллективы СибГАУ принимают активное участие в выполнении НИОКР, финансируемых в рамках тематических планов, федеральных и краевых программ, хозяйственных договоров с предприятиями. Для повышения эффективности оформления заявок по проектам в СибГАУ реализована централизованная грантовая политика.

За последние годы общий объем НИОКР в университете вырос до 400 млн руб. в год. Объем научных исследований, приходящийся на одного преподавателя, возрос до 280 тыс. руб. при пороговом значении, установленном Минобрнауки РФ, 50 тыс. руб. Университет совместно с АО «ИСС» успешно выполняет работы по крупному проекту по программе взаимодействия предприятий и университетов в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Общая сумма проекта на 2013–2015 гг. составляет 356 млн руб.

На базе университета ежегодно проводится более 30 международных и всероссийских научных симпозиумов и конференций по перспективным научным направлениям в области авиационной и ракетно-космической техники, среди которых широко известная ежегодная Международная конференция «Решетневские чтения» (в 2014 г. – XVIII).

В области интеллектуальной собственности только за прошедший год получено 48 свидетельств на программы ЭВМ и базы данных, 16 патентов, поставлено на учет 126 объектов интеллектуальной собственности.

Научно-техническое сотрудничество с базовыми предприятиями университета осуществляется в рамках утвержденной Правительством РФ Федеральной трансотраслевой технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система», концепция которой разработана в АО «ИСС» совместно с СибГАУ.

В сентябре 2014 г. университет совместно с базовыми предприятиями выиграл конкурс по поддержке программы развития системы подготовки кадров для оборонно-промышленного комплекса России на 2014–2016 гг.

Продолжается дальнейшее развитие ресурсного центра «Космические аппараты и системы», оснащение его новейшим специализированным оборудованием. Дооснащение центра современным оборудованием является важным шагом диверсификации широкого спектра НИОКР, увеличения объемов НИР, развития инновационной инфраструктуры, обеспечивающей полный технологический цикл проектирования и производства космической техники нового поколения: научные исследования, опытно-конструкторская и технологическая разработка, опытное производство. Отработана технология производства изделий из углепластика. На базе ресурсного центра в 2014 г. прошли обучение 12 специалистов из Республики Казахстан и 15 сотрудников АО «Красмаш» в области конструирования ракетно-космической техники и по программе разработки и изготовления габаритно-весовых макетов космического спутника связи KazSat-3.

В университете создана успешная интегрированная система подготовки инженерных кадров для космической промышленности с использованием оригинальных технологий проектно-командной работы студентов, сочетающая баланс между новшествами и традициями, между обучением и научными исследованиями и сохраняющая гибкость в построении образовательной траектории. По результатам работ в данном направлении коллектив авторов СибГАУ и

АО «ИСС» удостоен премии Правительства Российской Федерации имени Ю. А. Гагарина в области космической деятельности.

Гордостью университета является Студенческий центр управления полетами (ЦУП). Студенты технических специальностей на учебных занятиях имеют уникальную возможность непосредственно осуществлять управление российскими МКА («Юбилейный», «Можаец», «Чибис» и перспективных «Михайло Ломоносов» и «Бауманец-2») и спутниками Берлинского технического университета (DLRSAT, TUBSAT), принимать и обрабатывать телеметрическую информацию (sat.sibsau.ru). В центре также проходят учебные занятия на программном имитаторе современного телекоммуникационного КА «Экспресс-АМ», который полностью моделирует работу всех служебных подсистем спутника, используется для опытной отработки бортового комплекса управления и обучения работе с реальным КА. Студенческий ЦУП СибГАУ выполняет важную роль наземного сегмента создаваемой университетом с партнерами орбитальной группировки технологических и научно-образовательных МКА.

Активно развивается обсерватория СибГАУ и музей ракетно-космической техники, на базе которых проходят многочисленные научно-образовательные мероприятия и экскурсии для школьников и студентов Красноярского края. За прошедший год сотрудниками обсерватории открыто 200 новых переменных звезд.

За достижения в научной и учебной деятельности в 2014 г. студентами университета получены две премии Главы города Красноярска молодым талантам, шесть краевых именных стипендий, стипендия Президента РФ (основная, квота), две стипендии Правительства РФ (основная, квота), 18 стипендий Президента РФ и 31 стипендия Правительства РФ по приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики, одна стипендия имени В. Г. Шухова, четыре премии Правительства РФ для поддержки талантливой молодежи, три премии главы администрации Ленинского района, одна премия «Интеллект и культура», шесть стипендий НБО «Благотворительный фонд Потанина», 15 именных стипендий СибГАУ и базовых предприятий, более 100 повышенных государственных академических стипендий за достижения в научно-исследовательской деятельности, 8 студенческих проектов поддержаны по программе «УМНИК».

Большое внимание СибГАУ уделяет развитию международного сотрудничества в области системы подготовки кадров с зарубежными вузами и организациями из стран СНГ, Китая, Чехии, Словении, Венгрии, Германии и др. Университет входит в состав целого ряда международных образовательных консорциумов и ассоциаций технических университетов, что позволяет реализовывать совместные и сетевые образовательные проекты.

За последние годы число иностранных граждан, обучающихся в университете на основных и дополнительных образовательных программах, достигло более 100 человек в год. Среди обучающихся в СибГАУ – граждане стран СНГ, Демократической Республики Конго, Индии, Бангладеш, Сирии, Чехии, Венгрии, Германии и других стран мира. Успешно проведенная программа обучения специалистов Республики Казахстан на базе ресурсного центра «Космические аппараты и системы» стала основой для разработки программы магистерской подготовки, рассчитанной на иностранных студентов.

Университет активно участвует в развитии Федеральной трансотраслевой технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система», является координатором развития региональной технологической платформы «Информационно-телекоммуникационные и космические технологии для инновационного развития Сибири». В целях использования результатов космической деятельности для социально-экономического развития Красноярского края на базе университета создан Региональный научно-технологический центр космических услуг. Установлены и функционируют на базе СибГАУ и Сибирского федерального университета приемные комплексы данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Высокий уровень подготовки специалистов, широкое развитие фундаментальной и прикладной науки во взаимодействии с институтами РАН и наукоемкими предприятиями ракетно-космической отрасли позиционируют СибГАУ как лидера в области подготовки кадров для ОПК, аэрокосмической отрасли и других предприятий высокотехнологичного сектора экономики.

И. В. Ковалев

Ректор Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Раздел
Part
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

УДК 519.854.33

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 16–21

ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В ДАННЫХ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КАК ЗАДАЧА УСЛОВНОЙ ПСЕВДОБУЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А. Н. Антамошкин, И. С. Масич

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: i-masich@yandex.ru

Создание и использование логических алгоритмов классификации основывается на выявлении в исходных данных закономерностей, из набора которых формируется решающая функция. Поиск закономерностей можно рассматривать как задачу комбинаторной оптимизации. Для получения более эффективного решения выбор алгоритма оптимизации следует производить исходя из характерных свойств, присущих рассматриваемой оптимизационной задаче. Рассматриваются некоторые свойства задач оптимизации, решаемых в ходе поиска логических закономерностей в данных.

Рассматривается задача распознавания объектов, описываемых бинарными признаками и разделенных на два класса. Закономерности являются элементарными блоками для построения логических алгоритмов распознавания.

Задачу нахождения максимальной закономерности можно записать в виде задачи условной псевдобулевой оптимизации. Проводится исследование свойств оптимизационной модели, описывающей поиск логических закономерностей в данных.

Результаты исследований показывают, что в пространстве поиска имеется множество постоянства целевой функции, которое затрудняет работу алгоритмов оптимизации, начинающих поиск из допустимой точки и ведущих его по соседним точкам, так как вычисление целевой функции в системе окрестностей, состоящей из соседних точек, не дает информации о наилучшем направлении поиска. При решении практических задач больших размерностей это множество постоянства может быть таким, что ему принадлежит большая часть точек допустимой области.

Рассматриваются возможности улучшения алгоритмов поиска закономерностей. Проводится экспериментальное исследование на практических задачах распознавания. Результаты экспериментов показывают, что использование информации о близости объектов выборки к закономерности позволяет преодолеть трудности, связанные с характерными особенностями решаемой задачи оптимизации и проявляющиеся в наличии множеств постоянства, и находить лучшие закономерности в данных для их использования в решении задач распознавания.

Ключевые слова: классификация, логические закономерности, псевдобулевая оптимизация.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 16–21

DETECTION OF PATTERNS IN DATA FOR RECOGNITION OF OBJECTS AS A CONDITIONAL PSEUDO-BOOLEAN OPTIMIZATION PROBLEM

A. N. Antamoshkin, I. S. Masich

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: i-masich@yandex.ru

Creating and using logical classification algorithms are based on revealing patterns in the input data, and a decision function is formed from a set of these patterns. Search for patterns can be viewed as a combinatorial optimization problem. To produce the most effective solutions, the choice of the optimization algorithm should be made on the basis of the characteristic properties inherent in the considered optimization problem. In this paper we consider some properties of optimization problems that are solved in the course of finding logical patterns in the data.

We consider the recognition problem for objects described by binary attributes and divided into two classes. Regularities are the elementary blocks for construction logical recognition algorithms.

The problem of finding the maximum patterns can be written in the form of a constrained pseudo-Boolean optimization problem. We study the properties of the optimization model, which describes the search for logical patterns in the data.

Research results show that in the search space there is a set of constancy of the objective function. This hampers performance of the optimization algorithms, which begin the search from a feasible point and leading it to neighboring points, since the calculation of the objective function in the system of neighborhoods consisting of neighboring points, gives no information on best search direction. While solving practical problems of large dimension, this set of constancy may own most of the points of the feasible region.

We consider the possibilities of improving algorithms of search for patterns. Experimental investigations were conducted on the real-world recognition problems. Experimental results show that the use of information about the proximity of the sample objects to patterns can overcome the difficulties associated with the characteristic features of optimization problem solved and manifested in the presence of constancy sets. And this allows finding the best patterns in the data to use them in solving the recognition problems.

Keywords: classification, logical patterns, pseudo-Boolean optimization.

Введение. Среди множества подходов к распознаванию образов можно выделить группу методов, основанных на выявлении закономерностей в наборах исходных данных и использовании этих закономерностей для формирования решающих правил. Эти закономерности представляют собой логические условия, связывающие комбинации значений некоторых признаков, описывающих объекты распознавания, с определенным классом объектов. Описываемый и схожие подходы с успехом применяются для решения практических задач распознавания, в том числе и в аэрокосмической отрасли [1–4].

Создание и использование логических алгоритмов классификации основывается на выявлении в исходных данных закономерностей, из набора которых формируется решающая функция. Поиск закономерностей можно рассматривать как задачу комбинаторной оптимизации. Для получения более эффективного решения выбор алгоритма оптимизации следует производить исходя из характерных свойств, присущих рассматриваемой оптимизационной задаче. В данной работе рассматриваются некоторые свойства задач оптимизации, решаемых в ходе поиска логических закономерностей в данных.

Ограничимся рассмотрением задачи распознавания объектов, описываемых бинарными признаками и разделенных на два класса $K = K^+ \cup K^- \subset B_2^n$, где $B_2^n = \{0,1\}$, $B_2^n = B_2 \times B_2 \times \cdots \times B_2$. При этом классы не пересекаются: $K^+ \cap K^- = \varnothing$. Объект $X \in K$ описывается бинарным вектором $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ и может быть представлен как точка в гиперкубе пространства бинарных признаков B_2^n. Объекты класса K^+ будем называть положительными точками выборки K, а объекты класса K^- – отрицательными точками выборки.

Рассмотрим подмножество точек из B_2^n, у которых некоторые переменные фиксированы и одинаковы, а остальные принимают произвольное значение

$$T = \{x \in B_2^n \,|\, x_i = 1 \text{ для } \forall i \in A \text{ и } x_j = 0 \text{ для } \forall j \in B\}$$

для некоторых подмножеств $A, B \subseteq \{1, 2, \ldots, n\}$, $A \cap B = \varnothing$. Это множество может быть также определено в виде булевой функции, принимающей истинное значение для элементов множества:

$$t(x) = (\bigwedge_{i \in A} x_i) \wedge (\bigwedge_{j \in B} \bar{x}_j).$$

Этот терм выделяет подкуб в булевом гиперкубе B_2^n, число точек подкуба равно $2^{(n-|A|-|B|)}$.

Будем считать, что терм t покрывает точку $a \in B_2^n$, если $t(a) = 1$, т. е. эта точка принадлежит соответствующему подкубу.

Под *закономерностью P* (или *правилом*) в данном случае понимается терм, который покрывает хотя бы один объект некоторого класса и не покрывает ни одного объекта другого класса [5]. То есть закономерность соответствует подкубу, имеющему непустое пересечение с одним из множеств (K^+ или K^-) и пустое пересечение с другим множеством (K^- или K^+ соответственно). Закономерность P, которая не пересекается с K^-, будем называть положительной, а закономерность P', которая не пересекается с K^+, – отрицательной. В дальнейшем, для определенности, будем рассматривать только положительные закономерности.

Закономерности являются элементарными блоками для построения логических алгоритмов распознавания [6–8]. Наиболее полезными для этой цели являются закономерности с наибольшим покрытием (максимальные закономерности), т. е. такие, для которых $|P \cap K^+|$ максимально [9].

Один из путей в составлении набора закономерностей для алгоритма распознавания – это поиск закономерностей, опирающихся на значения признаков конкретных объектов.

Поиск максимальных закономерностей. Выделим некоторый объект $a \in K^+$. Обозначим P^a закономерность, покрывающую точку a. Те переменные, которые зафиксированы в P^a, равны соответствующим значениям признаков объекта a.

Для задания закономерности P^a введем бинарные переменные $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й признак фиксирован в } P^a; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Отметим, что если i-й признак фиксирован в P^a (т. е. $y_i = 1$), то он обязательно равен a_i (иначе эта закономерность не будет покрывать базовый объект a). При $Y = (1, 1, \ldots, 1)$ закономерность покрывает лишь сам базовый объект a (и полностью совпадающие с ним объекты), но не покрывает ни один объект, отличающийся значением хотя бы одного признака.

Некоторая точка $b \in K^+$ будет покрываться закономерностью P^a только в том случае, если $y_i = 0$ для всех i, для которых $b_i \neq a_i$. С другой стороны, некоторая точка $c \in K^-$ не будет покрываться закономерностью P^a в том случае, если $y_i = 1$ хотя бы для одной переменной i, для которой $c_i \neq a_i$.

Таким образом, задачу нахождения максимальной закономерности можно записать в виде задачи поиска таких значений $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$, при которых получаемая закономерность P^a покрывает как можно больше точек $b \in K^+$ и не покрывает ни одной точки $c \in K^-$ [10]:

$$\sum_{b \in K^+} \prod_{\substack{i=1 \\ b_i \neq a_i}}^{n} (1 - y_i) \to \max,$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ c_i \neq a_i}}^{n} y_i \geq 1 \text{ для всех } c \in K^- .$$

Эта задача является задачей условной псевдобулевой оптимизации, т. е. задачей оптимизации, в которой целевая функция и функции, находящиеся в левой части ограничения, являются псевдобулевыми функциями – вещественными функциями булевых переменных.

Следует заметить, что любая точка $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$ соответствует подкубу в пространстве бинарных признаков $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, включающему в себя объект a. При $Y \in O_k(Y^1)$ (т. е. Y отличается от Y^1 значением k координат), где $Y^1 = (1, 1, \ldots, 1)$, число точек этого подкуба равно 2^k.

Основные понятия и свойства. Для исследования и описания свойств приведенной выше модели оптимизации изложим основные понятия и определения, связанные с построением алгоритмов псевдобулевой оптимизации [11]:

1. Точки $X^1, X^2 \in B_2^n$ назовем *k-соседними*, если они отличаются значением k координат, $k = \overline{1,n}$.

2. Множество $O_k(X)$, $k = \overline{0,n}$, всех точек B_2^n, k-соседних к точке X, назовем *k-м уровнем* точки X.

3. Точку $X \in B_2^n$ назовем *k-соседней множеству* $A \subset B_2^n$, если $A \cap O_k(X) \neq \varnothing$ и $\forall l = \overline{0, k-1}$: $A \cap O_l(X) = \varnothing$.

4. Точку $X^* \in B_2^n$, для которой $f(X^*) < f(X)$, $\forall X \in O_1(X^*)$, назовем *локальным минимумом* псевдобулевой функции f.

5. Псевдобулевую функцию, имеющую только один локальный минимум, будем называть *унимодальной* на B_2^n функцией.

6. Унимодальную функцию f назовем *монотонной* на B_2^n, если $\forall X^k \in O_k(X^*), k = \overline{1,n}$: $f(X^{k-1}) \leq f(X^k)$, $\forall X^{k-1} \in O_{k-1}(X^*) \cap O_1(X^k)$.

7. Множество точек $W(X^0, X^l) = \{X^0, X^1, \ldots, X^l\} \subset B_2^n$ назовем *путем* между точками X^0 и X^l, если $\forall\ i = 1, \ldots, l$ точка X^i является соседней к X^{i-1}.

8. Путь $W(X^0, X^l) \subset B_2^n$ между k-соседними точками X^0 и X^l назовем *кратчайшим*, если $l = k$.

9. $\forall X, Y \in B_2^n$ объединение всех кратчайших путей $W(X, Y)$ будем называть *подкубом* B_2^n и обозначать $K(X, Y)$.

Рассмотрим основные свойства множества допустимых решений задачи условной псевдобулевой оптимизации. Имеется задача следующего вида

$$C(X) \to \max_{X \in S \subset B_2^n}, \tag{1}$$

где $C(X)$ – монотонно возрастающая от X^0 псевдобулевая функция; $S \subset B_2^n$ – некоторая подобласть пространства булевых переменных, определяемая заданной системой ограничений, например:

$$A_j(X) \leq H_j, j = \overline{1,m}. \tag{2}$$

Введем ряд понятий для подмножества точек пространства булевых переменных [12]:

– точка $Y \in S$ является *граничной точкой* множества S, если существует $X \in O_1(Y)$, для которой $X \notin S$;

– точку $Y \in O_i(X^0) \cap S$ будем называть *крайней точкой* множества S с базовой точкой $X^0 \in S$, если $\forall X \in O_1(Y) \bigcap O_{i+1}(X^0)$ выполняется $X \notin S$;

– ограничение, определяющее подобласть пространства булевых переменных, будем называть *активным*, если оптимальное решение задачи условной оптимизации не совпадает с оптимальным решением соответствующей задачи оптимизации без учета ограничения.

Одно из свойств множества допустимых решений состоит в следующем: если целевая функция является монотонной унимодальной функцией, а ограничение активно, то оптимальным решением задачи (1) будет точка, принадлежащая подмножеству крайних точек множества допустимых решений S с базовой точкой X^0, в которой целевая функция принимает наименьшее значение:

$$C(X^0) = \min_{X \in B_2^n} C(X).$$

Свойства множества допустимых решений. Рассмотрим отдельное ограничение

$$A_j(Y) \geq 1,$$

где $A_j(Y) = \sum_{\substack{i=1 \\ c_i^j \neq a_i}}^{n} y_i$ для всех $c^j \in K^-, j = \{1, 2, \ldots, |K^-|\}$.

Введем обозначение

$$z_i^j = \begin{cases} 1, & \text{если } c_i^j \neq a_i; \\ 0, & \text{если } c_i^j = a_i. \end{cases}$$

Тогда

$$A_j(Y) = \sum_{i=1}^{n} z_i^j y_i.$$

Функция $A_j(Y)$ монотонно убывает от точки $Y^1 = (1,\ 1,\ ...,\ 1)$.

Крайними точками допустимой области являются точки $Y_k \in O_{n-1}(Y^1)$ (либо, что то же самое, $Y_k \in O_1(Y^0)$), причем такие, что Y_k отличаются от $Y^0 = (0,\ 0,\ ...,\ 0)$ значением k-й компоненты, при которой $z_k^j = 1$.

Множеством допустимых решений является объединение подкубов, образуемых крайними точками допустимой области и точкой Y^1:

$$\bigcup_{k:z_k^j=1} K(Y_k, Y^1).$$

Теперь вернёмся ко всей системе ограничений

$$A_j(Y) \geq 1, \text{ для всех } j = 1, 2, ..., |K^-|.$$

Этой системе будут удовлетворять точки, принадлежащие множеству

$$\bigcap_{j=1}^{|K^-|} \bigcup_{k:z_k^j=1} K(Y_k^j, Y^1),$$

которое, в конечном счете, является объединением конечного числа подкубов. Крайние точки допустимой области могут находиться на совершенно разных уровнях точки Y^1. А их количество, в худшем случае, может достигать значения $C_n^{[n/2]}$, т. е. мощности срединного уровня.

«Двойственные» алгоритмы оптимизации, т. е. алгоритмы, начинающие поиск из недопустимой области (в данном случае, например, из точки Y^0), приводят к поиску ближайших допустимых точек, которые зачастую имеют не очень высокие значения целевой функции, так как лучшие решения могут находиться на любом уровне Y^0.

Свойства целевой функции. Рассмотрим целевую функцию

$$C(Y) = \sum_{b \in K^+} \prod_{\substack{i=1 \\ b_i \neq a_i}}^{n} (1 - y_i)$$

для некоторого «базового» объекта $a \in K^+$. Либо можно записать

$$C(Y) = \sum_{j=1}^{|K^+|} \prod_{i=1}^{n} z_i^j (1 - y_i).$$

Функция $C(X)$ монотонно возрастает от точки $Y^1 = (1,\ 1,\ ...,\ 1)$, принимая в ней значение 1, что соответствует покрытию «базового» объекта a. Наибольшее значение, равное $|K^+|$, функция $C(X)$ принимает в точке $Y^0 = (0,\ 0,\ ...,\ 0)$.

Положим, что ближайший к объекту a объект $b \in K^+$ отличается значением s компонент:

$$s = \min_{b \in K^+ \setminus \{a\}} \sum_{i=1}^{n} |a_i - b_i|.$$

Во всех точках $Y \in O_k(Y^1)$, $k = 0,\ 1,\ ...,\ s-1$, значение целевой функции будет одинаковым и равным 1. Наличие такого множества постоянства затрудняет работу алгоритмов оптимизации, начинающих поиск из допустимой точки Y^1 и ведущих его по соседним точкам, так как вычисление целевой функции в системе окрестностей, состоящей из соседних точек, не дает информации о наилучшем направлении поиска.

При решении практических задач больших размерностей это множество постоянства может быть таким, что ему принадлежит большая часть точек допустимой области. Это усложняет или делает невозможной работу таких алгоритмов, как генетический алгоритм, локальный поиск с мультистартом.

Поиск закономерностей по системе окрестностей. Некоторые алгоритмы поиска закономерностей путем решения задачи условной псевдобулевой оптимизации, приведенной выше, описаны в [13; 14]. Один из них – алгоритм поиска по соседним точкам – выглядит следующим образом.

Алгоритм 1.

1. Положим $Y = Y^1$, $i = 1$.
2. Вычисляем $C(Y_j)$ и $A(Y_j)$ для $Y_j \in O_1(Y) \cap O_i(Y^1)$, $j = 1,\ 2,\ ...,\ n - i + 1$.
3. Если нет Y_j, для которых $A(Y_j) = 1$, то $Y^* = Y$ – решение задачи.
4. Из тех Y_j, для которых $A(Y_j) = 1$, находим $Y = \arg\min_{Y_j} C(Y_j)$.
5. Положим $i = i + 1$, перейти на шаг 2.

Обобщенная функция ограничения $A(Y)$ вычисляется следующим образом:

$$A(Y) = \begin{cases} 1, & \text{если } A_j(Y) \geq 1, \text{ для всех } j = 1,\ 2,\ ...,\ |K^-|; \\ 0, & \text{в другом случае.} \end{cases}$$

Основная трудность, возникающая при наличии множеств постоянства, т. е. связанных множеств, в которых функция принимает одинаковое значение, состоит в отсутствии информации о том, в каком направлении следует вести поиск для получения оптимальных или субоптимальных решений. Это касается поведения функций $C(Y)$ и $A(Y)$ в пространстве бинарных переменных. Один из способов улучшить ситуацию – использовать информацию не только о покрытии закономерностью объектов выборки, но также использовать данные о расстоянии до непокрытых пока объектов.

Рассмотрим множество точек, задаваемое закономерностью P^a и некоторый объект $b \in K \setminus P^a$. Естественный способ определить близость объекта b к P^a – это использовать номер уровня k, при котором $b \in O_k(P^a)$. Величина $r(P^a, b) = k$ определяет степень близости объекта b к множеству P^a.

Закономерность P^a, задаваемая переменными $Y = (y_1,\ y_2,\ \ldots,\ y_n)$, представляет собой подкуб в пространстве признаков $X = (x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_n)$. Поэтому величину $r(P^a, b)$ можно вычислить как число фиксированных компонент в закономерности P^a, для которых значение соответствующего признака объекта b отличается от значения признака a:

$$r(P^a, b) = \sum_{i=1}^{n} y_i \cdot | a_i - b_i |.$$

Величина

$$R^+(P^a) = \sum_{b \in K^+ \setminus P^a} r(P^a, b)$$

показывает суммарную близость положительных объектов выборки, не покрывающихся закономерностью P^a к этой закономерности. Для множества объектов другого класса

$$R^-(P^a) = \sum_{c \in K^- \setminus P^a} r(P^a, c).$$

Величины $R^+(P^a)$ и $R^-(P^a)$ могут использоваться при выборе направления при поиске. Например, последующую допустимую точку можно выбирать исходя из минимума отношения $R^+(P^a) / R^-(P^a)$.

Ниже приведен один из алгоритмов оптимизации, осуществляющий поиск по соседним точкам, который способен вести поиск во множестве постоянства целевой функции.

Алгоритм 2.

1. Положим $Y = Y^1$, $i = 1$.
2. Вычисляем $S(Y_j)$ и $A(Y_j)$ для $Y_j \in O_1(Y) \cap O_i(Y^1)$, $j = 1, 2, ..., n - i + 1$.
3. Если нет Y_j, для которых $A(Y_j) = 1$, то $Y^* = Y$ – решение задачи.
4. Из тех Y_j, для которых $A(Y_j) = 1$, находим $Y = \arg\min_{Y_j} S(Y_j)$.
5. Положим $i = i + 1$, перейти на шаг 2.

Здесь

$$A(Y) = \begin{cases} 1, \text{ если } A_j(Y) \geq 1, \text{ для всех } j = 1, 2, ..., |K^-|; \\ 0, \text{ в другом случае;} \end{cases}$$

$$S(Y) = \frac{R^+(P^a)}{R^-(P^a)},$$

где P^a – закономерность, соответствующая Y.

Результаты. Проведено экспериментальное сравнение двух описанных выше алгоритмов поиска правил на ряде задач распознавания [15; 16]. Решались следующие задачи распознавания (в скобках приведено краткое обозначение задачи, используемое при описании результатов): диагностика рака молочной железы (breast-cancer, wdbc); диагностика наследственного гипатита (hepatitis); данные по сердечной компьютерной томографии (spect); диагностика осложнений инфаркта миокарда – фибрилляция предсердий (infarction).

Результаты получены с помощью разработанного авторами программного обеспечения [17; 18]. Результаты представлены в таблице. Для каждой задачи в таблице приведено число переменных (число исходных признаков / число переменных, полученное в результате бинаризации исходных признаков); объем выборки (число наблюдений); среднее покрытие правил, найденных алгоритмами (число правил равно объему выборки). Покрытие положительного (отрицательного) правила вычисляется как отношение числа покрываемых им положительных (отрицательных) объектов к общему числу положительных (отрицательных) объектов.

Сравнение правил

Задача	Число переменных	Объем выборки	Покрытие правил, алгоритм 1	Покрытие правил, алгоритм 2
breast-cancer	9 / 80	699	0,5	0,65
wdbc	30 / 66	569	0,35	0,54
hepatitis	19 / 37	155	0,22	0,33
spect	22 / 22	80	0,14	0,16
infarction	112/ 216	338	0,04	0,12

Заключение. Результаты экспериментов показывают, что использование близости объектов выборки к закономерности позволяет преодолеть трудности, связанные с характерными особенностями решаемой задачи оптимизации и проявляющиеся в наличии множеств постоянства, и находить лучшие закономерности в данных для их использования в решении задач распознавания.

Библиографические ссылки

1. Dupuis C., Gamache M., Páge J. F. Logical analysis of data for estimating passenger show rates in the airline industry // Journal of Air Transport Management. 2012. № 18. P. 78–81.
2. Hammer P. L., Bonates T. O. Logical analysis of data – An overview: From combinatorial optimization to medical applications // Annals of Operations Research 2006. 148.
3. Esmaeili S. Development of equipment failure prognostic model based on logical analysis of data : Master of Applied Science Thesis. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 2012.
4. An implementation of logical analysis of data / E. Boros [et al.] // IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering. 2000. 12. P. 292–306.
5. Hammer P. L. The Logic of Cause-effect Relationships // Lecture at the International Conference on Multi-Attribute Decision via Operations Research-based Expert Systems. Passau, Germany : Universitat Passau, 1986.
6. Pareto-optimal patterns in logical analysis of data / P. L. Hammer [et al.] // Discrete Applied Mathematics. 2004. № 144(1). P. 79–102.
7. Alexe G., Hammer P. L. Spanned patterns for the logical analysis of data // Discrete Appl. Math. 2006. T. 154. P. 1039–1049.
8. Guoa C., Ryoo H. S. Compact MILP models for optimal and Pareto-optimal LAD patterns // Discrete Applied Mathematics. 2012. T. 160. P. 2339–2348.
9. The maximum box problem and its application to data analysis / J. Eckstein [et al.] // Computational Optimization and Applications. 2002. T. 23. P. 285–298.

10. Bonates T. O., Hammer P. L., Kogan A. Maximum Patterns in Datasets // Discrete Applied Mathematics. 2008. Vol. 156. No. 6. P. 846–861.

11. Антамошкин А. Н. Регулярная оптимизация псевдобулевых функций. Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1989. 284 с.

12. Antamoshkin A. N., Masich I. S. Pseudo-Boolean optimization in case of unconnected feasible sets // Models and Algorithms for Global Optimization. Series: Springer Optimization and Its Applications. Springer. 2007. Vol. 4. P. 111–122.

13. Антамошкин А. Н., Масич И. С. Эффективные алгоритмы условной оптимизации монотонных псевдобулевых функций // Вестник СибГАУ. 2003. Вып. 4. С. 60–67.

14. Масич И. С. Приближенные алгоритмы поиска граничных точек для задачи условной псевдобулевой оптимизации // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 1(8). С. 39–43.

15. Bache K., Lichman M. UCI Machine Learning Repository. Irvine, CA : University of California, School of Information and Computer Science, 2013. URL: http://archive.ics.uci.edu/ml.

16. Осложнения инфаркта миокарда: база данных для апробации систем распознавания и прогноза / С. Е. Головенкин [и др.] // Препринт. 1997. № 6. Красноярск: Вычислительный центр СО РАН.

17. Модель логического анализа для решения задачи прогнозирования осложнений инфаркта миокарда / С. Е. Головенкин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4(30). С. 68–73.

18. Логический анализ данных в задачах классификации : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / И. С. Масич, Р. И. Кузьмич, Е. М. Краева. № 2011612265. 2011.

References

1. Dupuis C., Gamache M., Páge J. F. Logical analysis of data for estimating passenger show rates in the airline industry, Journal of Air Transport Management 18, 2012. P. 78–81.

2. Hammer P. L., Bonates T. O. Logical analysis of data - An overview: From combinatorial optimization to medical applications. Annals of Operations Research 148, 2006.

3. Esmaeili S. Development of equipment failure prognostic model based on logical analysis of data, Master of Applied Science Thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, July 2012.

4. Boros E., Hammer P. L., Ibaraki T., Kogan A., Mayoraz E., Muchnik I. An implementation of logical analysis of data, IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering 12, 2000. P. 292–306.

5. Hammer P. L. The Logic of Cause-effect Relationships. *Lecture at the International Conference on Multi-Attribute Decision via Operations Research-based Expert Systems*. Passau, Germany : Universitat Passau, 1986.

6. Hammer P. L., Kogan A., Simeone B., Szedmák S. Pareto-optimal patterns in logical analysis of data. *Discrete Applied Mathematics*, 2004, vol. 144, no. 1, p. 79–102.

7. Alexe G., Hammer P. L. Spanned patterns for the logical analysis of data, *Discrete Appl. Math.* 2006, vol. 154, p. 1039–1049.

8. Guoa C., Ryoo H. S. Compact MILP models for optimal and Pareto-optimal LAD patterns, *Discrete Applied Mathematics*, 2012, vol. 160, p. 2339–2348.

9. Eckstein J., Hammer P. L., Liu Y., Nediak M., Simeone B. The maximum box problem and its application to data analysis. *Computational Optimization and Applications.* 2002, vol. 23, p. 285–298.

10. Bonates T. O., Hammer P. L., Kogan A. Maximum Patterns in Datasets. *Discrete Applied Mathematics*, 2008, vol. 156, no. 6, p. 846–861.

11. Antamoshkin A. N. *Regulyarnaya optimizatsiya psevdobulevykh funktsiy.* [Regular optimization of pseudo-functions]. Krasnoyarsk, Izd-vo Krasnoyarskogo un-ta Publ., 1989, 284 p.

12. Antamoshkin A. N., Masich I. S. Pseudo-Boolean optimization in case of unconnected feasible sets. *Models and Algorithms for Global Optimization. Series: Springer Optimization and Its Applications*. Springer, 2007, vol. 4, p. 111–122.

13. Antamoshkin A. N., Masich I. S. [Efficient algorithms for constrained optimization pseudo-monotone functions]. *Vestnik SibGAU*. 2003, no. 4, p. 60–67 (In Russ.).

14. Masich I. S. [The heuristic algorithms of boundary points search for an constraint pseudo-boolean optimization problem.] *Vestnik SibGAU*. 2006, no. 1(8), p. 39–43. (In Russ.)

15. Bache K., Lichman M. UCI Machine Learning Repository. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science, 2013. Available at: http://archive.ics.uci.edu/ml.

16. Golovenkin S. E. et al. *Oslozhneniya infarkta miokarda: baza dannykh dlya aprobatsii sistem raspoznavaniya i prognoza* [Complications of myocardial infarction: a database for testing recognition systems and forecasting]. Krasnoyarsk, Vychislitel'nyy tsentr SO RAN, Preprint no. 6, 1997 (In Russ.).

17. Golovenkin S. E. et al. [Model of logical analysis for solving problem of prognosis of myocardial infarction complication]. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 4(30), p. 68–73 (In Russ.).

18. Masich I. S., Kuzmich R. I., Kraeva E. M. *Logicheskiy analiz dannykh v zadachakh klassifikatsii. Svidetel'stvo gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2011612265* [Logical analysis of data in classification problems. Certificate of state registration of the computer № 2011612265]. SibGAU, 2011 (In Russ.).

© Антамошкин А. Н., Масич И. С., 2015

UDC 591.87

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 22–27

SVM-BASED CLASSIFIER ENSEMBLES DESIGN WITH CO-OPERATIVE BIOLOGY INSPIRED ALGORITHM

Sh. A. Akhmedova*, E. S. Semenkin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
*E-mail: shahnaz@inbox.ru

The meta-heuristic called Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA) is used for the automated design of a support vector machine (SVM) based classifiers ensemble. Two non-standard schemes, based on the use of the locally most effective ensemble member's output, are used to infer the ensemble decision. The usefulness of the approach is demonstrated on four benchmark classification problems solved: two bank scoring problems (Australian and German) and two medical diagnostic problems (Breast Cancer Wisconsin and Pima Indians Diabetes). Numerical experiments showed that classifier ensembles designed by COBRA exhibit high performance and reliability for separating instances from different categories. Ensembles of SVM-based classifiers implemented in this way outperform many alternative methods on the mentioned benchmark classification problems.

Keywords: support vector machines, ensembles, biology inspired algorithms, classification, optimization.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 22–27

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВОВ МАШИН ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ КООПЕРАТИВНЫМ БИОНИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ

Ш. А. Ахмедова*, Е. С. Семенкин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: shahnaz@inbox.ru

Коллективный бионический алгоритм оптимизации Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA) был применен для автоматического проектирования коллективов классификаторов на базе машин опорных векторов. Для принятия решения коллективом использовались две нестандартные методики, основанные на учете выходных значений локально наиболее эффективного члена коллектива. Целесообразность применения разработанного подхода доказана на четырех задачах классификации: двух задачах банковского скоринга (австралийского и немецкого) и двух задачах медицинской диагностики (диагностирование опухоли груди и диабета). Численные эксперименты показали эффективность и работоспособность коллективов классификаторов, сгенерированных алгоритмом COBRA. Результаты, полученные коллективами машин опорных векторов, превосходили результаты многих альтернативных методов для указанных задач.

Ключевые слова: машины опорных векторов, коллективы, бионические алгоритмы, классификация, оптимизация.

Introduction. Classification problems are the problems of identifying to which of a set of categories a new instance belongs [1] that have many different applications such as computer vision, speech recognition, document classification, credit scoring and biological classification. Currently various algorithms for solving these problems are being developed. For example, the most sought tools for them are artificial neural networks [2], fuzzy logic [3], evolutionary algorithms [4] and other technologies. In this study the method called Support Vector Machines (SVM) [5] was considered.

SVM-based classifier design is equivalent to solving a constrained real-parameter optimization problem. Therefore a new collective nature inspired meta-heuristic Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA) [6], namely its modification for constrained problems COBRA-c [7], was used.

Efficient and successful operation of SVM-based classifiers was established and shown in various papers, for example, [8]. But nowadays highly increasing computing power and technology make possible the use of more complex intelligent architectures, taking advantage of

more than one intelligent technique in a collaborative way. So, one of the hybridization forms for using more than one technique is the ensemble approach.

Simple averaging, weighted averaging, majority voting and ranking are common methods usually applied to calculate the ensemble output. However in [9] a new scheme, based on the use of the locally most effective ensemble member's output, was proposed. Yet this scheme was originally developed for approximation problems. In this study the scheme mentioned in [9] was modified for solving classification problems in two ways.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 briefly describes the method COBRA and its modification COBRA-c. SVM-based classifier generated by meta-heuristic COBRA-c and the schemes, which were used to infer the ensemble decision, are presented in Section 3. In Section 4 developed approach was applied to four classification problems, such as bank scoring and medical diagnostic problems. In the Conclusion the results and directions for further research are discussed.

Co-Operation of Biology Related Algorithms. A new collective meta-heuristic called Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA) [6] was developed based on five well-known and similar nature-inspired algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO) [10], Wolf Pack Search (WPS) [11], the Firefly Algorithm (FFA) [12], the Cuckoo Search Algorithm (CSA) [13] and the Bat Algorithm (BA) [14]. Each of the above listed algorithms was originally developed for solving real-parameter unconstrained optimization problems and imitates a nature process or the behavior of an animal group. For example, the Bat Algorithm is based on the echolocation behavior of bats; the Cuckoo Search Algorithm was inspired by the obligate brood parasitism of some cuckoo species by laying their eggs in the nests of other host birds (of other species); the Firefly Algorithm was inspired by the flashing behavior of fireflies.

A precondition for the new algorithm was the fact that one cannot say which approach is the most appropriate for the given function and the given dimension (number of variables). Namely on the basis of investigation into the effectiveness of these optimization methods, it was established that the best results were obtained by different methods for different problems and for different dimensions; in some cases the best algorithm differs even for the same test problem if the dimension varies. Each strategy has its advantages and disadvantages.

The new meta-heuristic approach combines the major advantages of the algorithms listed above. Its basic idea consists of generating five populations (one population for each algorithm) which are then executed in parallel cooperating with each other (the so-called island model).

The algorithm proposed in [6] is a self-tuning meta-heuristic so there is no necessity to choose the population size for each algorithm. The number of individuals in the population of each component algorithm can increase or decrease depending on whether the fitness value improves on the current stage or not. If the fitness value does not improve during a given number of generations, then the size of all populations increases. And vice versa, if the fitness value constantly improves, then the size of all populations decreases. Also each population can "grow" by accepting individuals removed from other populations. The population "grows" only if its average fitness is better than the average fitness of all other populations. Thereby the "winner component algorithm" can be determined on each iteration/generation. The result of this kind of competition allows the presenting of the biggest resource (population size) to the most appropriate (in the current generation) algorithm.

Likewise, all populations communicate with each other by exchanging individuals in such a way that a part of the worst individuals of each population is replaced by the best individuals of other populations. It brings up-to-date information on the best achievements to all component algorithms and prevents their preliminary convergence to its own local optimum, which improves the group performance of all component algorithms.

The performance of the COBRA algorithm was evaluated on the set of 28 benchmark problems from the CEC'2013 competition [15]. Experiments showed that COBRA works successfully and is reliable on this benchmark and demonstrates competitive behavior. Results also showed that COBRA outperforms its component algorithms when the dimension grows and more complicated problems are solved [6].

As has already been mentioned, the COBRA approach was developed for solving unconstrained optimization problems, but in the real world, there are usually different constraints which should not be violated. So, COBRA-c, i. e. the modification of COBRA that can be used for solving constrained real-parameter optimization problems was proposed in [7].

The COBRA method was modified by applying three constraint handling methods: dynamic penalties [4], Deb's rule [16] and the technique described in [17]. Specifically the method proposed in [17] was implemented to the PSO-component of COBRA; at the same time other components were modified by implementing Deb's rule followed by calculating function values using dynamic penalties. The performance of the algorithm proposed in [7] was evaluated on the set of 18 scalable benchmark functions provided for the CEC 2010 competition and a special session on single objective constrained real-parameter optimization [18]. The meta-heuristic COBRA-c was compared with algorithms that participated in the competition CEC 2010. Eventually it was established that the COBRA-c approach is superior to 3-4 of the 14 winner-methods from this competition. Besides, COBRA-c also outperforms all its component algorithms.

SVM-based classifiers. Support vector machines are linear classification mechanisms, which represent examples from a training set as points in space mapped so that the examples of the separate categories are divided by a clear gap that is as wide as possible [5]. New examples (from a test set) are then mapped into the same space and predicted to belong to a category based on which side of the gap they fall. So, SVM-based classifiers linearly divide examples from different classes.

For example, a training set $X^l = \{(x_1, y_1), \ldots, (x_l, y_l)\}$, $x_i = (x_{i1}, \ldots, x_{im})$ and $y_i = -1$ or $y_i = +1$, assuming l examples with m real attributes, is given. The aim is to learn a hyper-plane with this dataset:

$$< w, x > + b = 0, \quad (1)$$

where < … > is a dot product, which separates examples labeled as –1 from ones labeled as +1. So using this hyper-plane, a new instance x is classified applying the following classifier:

$$f(x) = \begin{cases} 1, (< w, x > + b) \geq 1, \\ -1, (< w, x > + b) \leq -1. \end{cases} \quad (2)$$

SVM is based on the maximization of the distance between the discriminating hyper-plane and the closest examples. This maximization reduces the so-called structural risk, which is related to the quality of the decision function. The most discriminating hyper-plane can be computed by solving the following constrained optimization problem:

$$\| w \|^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$y_i (< w, x_i > + b) \geq 1, \; i = 1, \ldots, l. \quad (4)$$

Here $< w, x_i >$ is the usual scalar product of vectors, $\| w \|^2 = < w, w >$.

Thus, for solving the constrained optimization problem described above, i. e. for finding vector w and shift parameter b, the co-operative biology inspired metaheuristic CIBRA-c was used.

Ensembles design. Let the maximum number of SVM-based classifiers in one ensemble be equal to M. For the training and testing of SVM-based classifiers and the examination of the whole ensemble, the given dataset was divided by the following way: 60 % of instances from the dataset were randomly chosen as a training sample of each classifier, 20 % of instances were chosen as a testing sample of each classifier and the remaining 20 % of instances (hereinafter referred to as new instances) were used for investigation into the effectiveness of the ensemble. So, first of all for each of M SVM-based classifiers vector w and shift parameter b were found by using the COBRA-c algorithm and 60 % of instances from the dataset. After that for each classifier its classification error was evaluated on the testing sample. Thus, the ensemble of M SVM-based classifiers was designed by using 80 % of the given data.

Then two similar non-standard schemes, based on the use of output of the locally most effective ensemble member, were used to infer the ensemble decision. Each instance x from the dataset was represented as vector $x = (x_1, \ldots, x_n)$, where n is the number of attributes. The training and testing samples (80 % of instances from a given dataset) are hereinafter referred to as "old" sample. For each new instance y the "closest" instance z from the "old" sample was found. The closeness of instances was evaluated by the calculation of the Euclidian distance between their vector representations. The ensemble members, which classified the closest instance correctly, were determined. The difference between the two schemes can be described as follows:

1. First scheme. If only one ensemble member classified it correctly then this member will be used for the new instance y. In all remaining cases (there was more than one member that classified the closest instance correctly or none of the ensemble members classified it correctly) the ensemble member with the smallest classification error was chosen for the new instance y.

2. Second scheme. If only one ensemble member classified it correctly then this member will be used for the new instance y. If there was more than one member that classified the closest instance correctly then the criterion "confidence estimation" was used. The criterion value was calculated for each classifier in the following way:

$$ce(z) = < w, z > + b. \quad (5)$$

The classifier with the best criterion value according to the class of instance z (the smallest value if it was labeled as –1 or the highest value if the instance was labeled as +1) was chosen for the new instance y. But again if none of the ensemble members classified the closest instance z correctly then the ensemble member with the smallest classification error was chosen for the new instance y.

It should be noted that in this study the maximum number of SVM-based classifiers in one ensemble was set equal to 10, i. e. $M = 10$.

Experimental results. In order to load the developed optimization technique with a really hard task four benchmark classification problems: bank scoring in Australia, bank scoring in Germany, Breast Cancer Wisconsin and Pima Indians Diabetes [19] were chosen. That choice was conditioned by the fact that the problems mentioned were solved by other researchers many times with different methods. Thus there are many results obtained by alternative approaches that can be used for comparison.

Firstly two bank scoring problems were solved with SVM-based classifier ensembles: bank scoring in Australia and bank scoring in Germany [19]. For the Australian bank scoring problem, there are 14 attributes (6 numerical and 8 categorical), 2 classes, 307 examples of creditworthy customers and 383 examples of non-creditworthy customers. For the German bank scoring problem there are 20 attributes (13 qualitative and 7 numerical), 2 classes, 700 records of creditworthy customers and 300 records of non-creditworthy customers. Both datasets were taken from [19].

Alternative algorithms for comparison as well as the method of performance estimation are taken from [20]. The results obtained are demonstrated in tab. 1 where the portion of correctly classified instances from testing sets (%) is presented. In tab. 1 below the following abbreviations are used: SVME_01 is the SVM-based classifier ensemble with the first scheme, SVME_02 is the SVM-based classifier ensemble with the second scheme and SVM+COBRA is just single SVM-based classifiers generated by the algorithm COBRA-c.

Table 1

Performance comparison of classifiers for bank scoring problems

Classifiers	Scoring in Australia	Scoring in Germany
2SGP	90.27	80.15
C4.5	89.86	77.73
Fuzzy	89.10	79.40
GP	88.89	78.34
CART	87.44	75.65
LR	86.96	78.37
CCEL	86.60	74.60
RSM	85.20	67.70
Bagging	84.70	68.40
Bayesian	84.70	67.90
Boosting	76.00	70.00
k-NN	71.50	71.51
SVM+COBRA	90.22	79.60
SVME_01	90.29	79.63
SVME_02	90.25	79.63

So, for the Australian bank scoring problem the results obtained are better than for alternative classifiers from tab. 1 and for the German bank scoring problem the results obtained are the second best. The results in tab. 1 are averaged on 20 algorithm executions. The standard deviation for the Australian bank scoring problem was equal to 2.19 % for the first scheme and 1.03 % for the second scheme. The standard deviation for the German bank scoring problem was equal to 2.03 % for the first scheme and 1.35 % for the second scheme. But ensembles with the first scheme and ensembles with the second scheme demonstrated the same mean result for the German bank scoring problem. Also ensembles showed better results than the single SVM-based classifier.

It should be noted that despite the fact that the maximum number of classifiers in one ensemble was equal to 10, usually only 2–5 SVM-based classifiers were obtained for each ensemble. Also for SVM-based classifier design, i. e. for solving a constrained optimization problem, the maximum number of function evaluation was established to be equal to 10000.

After that two medical diagnostic problems were solved with SVM-based classifier ensembles: Breast Cancer Wisconsin Diagnostic and Pima Indians Diabetes [19]. For Breast Cancer Wisconsin Diagnostic there are 10 attributes (patient's ID that was not used for calculations and 9 categorical attributes which possess values from 1 to 10), 2 classes, 458 records of patients with benign cancer and 241 records of patients with malignant cancer. For Pima Indians Diabetes there are attributes (all numeric-valued), 2 classes, 500 patients who tested negative for diabetes and 268 patients who tested positive for diabetes). The benchmark data for these problems were also taken from [19].

The results obtained are presented in tab. 2 and tab. 3 where a portion of the correctly classified instances from testing sets is presented. There are in tab. 2 and tab. 3 also results of other researchers who used other approaches found in scientific literature [21; 22].

Table 2

Performance comparison of classifiers for the breast cancer problem

Author, year	Method	Accuracy, %
This study (2014)	SVME_01	98.57
This study (2014)	SVME_02	98.32
Authors results (2013)	SVM+COBRA	97.64
Quinlan (1996)	C4.5	94.74
Hamiton et al. (1996)	RAIC	95.00
Ster, Dobnikar (1996)	LDA	96.80
Nauck and Kruse (1999)	NEFCLASS	95.06
Pena-Reyes, Sipper (1999)	Fuzzy-GA1	97.36
Setiono (2000)	Neuro-rule 2a	98.10
Albrecht et al. (2002)	LSA machine	98.80
Abonyi, Szeifert (2003)	SFC	95.57
Polat, Günes (2007)	LS-SVM	98.53
Guijarro-Berdias et al. (2007)	LLS	96.00
Karabatak, Cevdet-Ince (2009)	AR + NN	97.40
Peng et al. (2009)	CFW	99.50

Table 3

Performance comparison of classifiers for the Pima Indians diabetes problem

Author, year	Method	Accuracy, %
This study (2014)	SVME_01	80.26
This study (2014)	SVME_02	80.10
Authors results (2013)	SVM+COBRA	79.98
H. Temurtas et al. (2009)	MLNN with LM (10xFC)	79.62
H. Temurtas et al. (2009)	PNN (10xFC)	78.05
H. Temurtas et al. (2009)	MLNN with LM	82.37
H. Temurtas et al. (2009)	PNN	78.13
M. R. Bozkurt et al. (2012)	PNN	72.00
M. R. Bozkurt et al. (2012)	LVQ	73.60
M. R. Bozkurt et al. (2012)	FFN	68.80
M. R. Bozkurt et al. (2012)	CFN	68.00
M. R. Bozkurt et al. (2012)	DTDN	76.00
M. R. Bozkurt et al. (2012)	TDN	66.80
M. R. Bozkurt et al. (2012)	Gini	65.97
M. R. Bozkurt et al. (2012)	AIS	68.80
S. M. Kamruzzaman et al. (2005)	FCNN with PA	77.34
K. Kayaer., T. Yıldırım (2003)	GRNN	80.21
K. Kayaer., T. Yıldırım (2003)	MLNN with LM	77.08
L. Meng et al. (2005)	AIRS	67.40

So, for the Pima Indians diabetes problem the results obtained are the second best. The results in tab. 2 and tab. 3 are averaged on 20 algorithm executions. The standard deviation for the breast cancer problem was equal to 0.84 % for the first scheme and 0.85 % for the second scheme. The standard deviation for the Pima Indians diabetes problem was equal to 2.68 % for the first scheme and 1.73 % for the second scheme. Again ensembles showed better results than the single SVM-based classifier.

As for the bank scoring problems, despite the fact that the maximum number of classifiers in one ensemble was equal to 10, usually only 2–5 SVM-based classifiers were obtained for each ensemble. Also for SVM-based classifier design, i. e. for solving a constrained optimization problem, the maximum number of function evaluation was established to be equal to 1000.

Conclusion. In this paper a new meta-heuristic for solving unconstrained optimization problems, called Co-Operation of Biology Related Algorithms, and its modification for solving constrained optimization problems, called COBRA-c, are described. Experiments showed that COBRA and COBRA-c work successfully and are reliable on different benchmark problems and demonstrate competitive behavior.

Then the described optimization method COBRA-c was used for the design of SVM-based classifier ensembles. The algorithm COBRA-c was used for the SVM-based classifier adjustment. This approach was applied to four real-world classification problems (two bank scoring problems and two medical diagnostic problems), the solving of which is equivalent to solving hard optimization problems where objective functions have many variables and are given in the form of a computational program. The suggested algorithm successfully solved all problems designing ensembles with the competitive performance that allows consideration of the study results as confirmation of the reliability, workability and usefulness of the algorithm in solving real world optimization problems.

Directions for future research are heterogeneous: improvement of the cooperation and competition scheme within the approach and development of ensembles whose members are not only SVM-based classifiers but also neural networks, for example.

Acknowledgment. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project 140/14.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, НИР 140/14.

References

1. Dietterich T. G. Machine learning research: Four current directions. *AI Mag.* 1997, no. 18, p. 97–136.

2. Rojas R. Neural networks: a systematic introduction. Springer-Verlag, Berlin. 1996, 502 p.

3. Yager R. R., Filev D. P. Essentials of fuzzy modeling and control. Wiley, New York. 1994, 408 p.

4. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to evolutionary computing. Springer, Berlin. 2003.

5. Vapnik V., Chervonenkis A. *Teoriya raspoznavaniya obrazov* [Theory of Pattern Recognition]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 415 p.

6. Akhmedova Sh., Semenkin E. Co-Operation of Biology Related Algorithms. In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2013). 2013. P. 2207–2214.

7. Akhmedova Sh., Semenkin E. [New optimization metaheuristic based on co-operation of biology related algorithms]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 4 (50), p. 92–99 (In Russ.).

8. Joachims T. Text categorization with Support Vector Machines: Learning with many relevant features. *In Proceedings of the 10th European Conference on Machine Learning (ECML'1998).* 1998, p. 137–142.

9. Popov E. A., Semenkina M. E., Lipinskiy L. V. [Evolutionary algorithm for automatic generation of neural network based noise suppression systems]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 4 (44), p. 79–82 (In Russ.).

10. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. *In Proceedings of International Conference on Neural networks IV*. 1995, p. 1942–1948.

11. Chenguang Yang, Xuyan Tu and Jie Chen. Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search. *In Proceedings of International Conference on Intelligent Pervasive Computing (IPC2007)*. 2007, p. 462–467.

12. Yang X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. *In Proceedings of 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications (SAGA 2009).* 2009, p. 169–178.

13. Yang X. S., Deb S. Cuckoo Search via Levy flights. *In Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBic2009).* 2009, p. 210–214.

14. Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization. *Studies in Computational Intelligence*. 2010, vol. 284, p. 65–74.

15. Liang J. J., Qu B. Y., Suganthan P. N., Hernandez-Diaz, A. G. Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2013 Special Session on Real-Parameter Optimization. Technical Report, Computational Intelligence Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou China, and Technical Report. Nanyang Technological University. Singapore. 2012.

16. Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2000, vol. 186 (2–4), p. 311–338.

17. Liang J. J., Shang Z., Li Z. Coevolutionary Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer. *In Proceedings of Congress on Evolutionary Computation (CEC'2010)*. 2010, p. 1505–1512.

18. Mallipeddi R., Suganthan P. N. Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2010 Competition on Constrained Real-Parameter Optimization. Technical report. Nanyang Technological University. Singapore. 2009.

19. Frank A., Asuncion, A. UCI Machine Learning Repository. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science. 2010. Available at: http://archive.ics.uci.edu/ml.

20. Huang J.-J., Tzeng G.-H., Ong Ch.-Sh. Two-stage genetic programming (2SGP) for the credit scoring model. *Applied Mathematics and Computation.* 2006, vol. 174, p. 1039–1053.

21. Marcano-Cedeno A., Quintanilla-Domínguez J., Andina D. WBCD breast cancer database classification applying artificial metaplasticity neural network. *Expert Systems with Applications: An International Journal.* 2011, vol. 38, iss. 8, p. 9573–9579.

22. Temurtas H., Yumusak N., Temurtas F. A comparative study on diabetes disease diagnosis using neural networks. *Expert Systems with Applications.* 2009, vol. 36, no. 4, p. 8610–8615.

Библиографические ссылки

1. Dietterich T. G. Machine learning research: Four current directions // AI Mag. 1997. 18. P. 97–136.

2. Rojas R. Neural networks: a systematic introduction. Berlin : Springer-Verlag, 1996. 502 p.

3. Yager R. R., Filev D. P. Essentials of fuzzy modeling and control. New York : Wiley, 1994. 408 p.

4. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to evolutionary computing. Berlin : Springer, 2003. 300 p.

5. Вапник В., Червоненкис А. Теория распознавания образов. М. : Наука, 1974. 415 с.

6. Akhmedova Sh., Semenkin E. Co-Operation of Biology Related Algorithms // Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2013). 2013. P. 2207–2214.

7. Ахмедова Ш. А., Семенкин Е. С. Новый коллективный метод оптимизации на основе кооперации бионических алгоритмов // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 92–99.

8. Joachims T. Text categorization with Support Vector Machines: Learning with many relevant features // Proceedings of the 10th European Conference on Machine Learning (ECML'1998). 1998. P. 137–142.

9. Попов Е. А., Семенкина М. Е., Липинский Л. В. Эволюционный алгоритм для автоматической генерации нейросетевых систем подавления шума // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (44). С. 79–82.

10. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of Intern. Conf. on Neural networks IV. 1995. P. 1942–1948.

11. Chenguang Yang, Xuyan Tu and Jie Chen. Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search // Proceedings of Intern. Conf. on Intelligent Pervasive Computing (IPC2007). 2007. P. 462–467.

12. Yang X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization // Proceedings of 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications (SAGA 2009). 2009. P. 169–178.

13. Yang X. S., Deb S. Cuckoo Search via Levy flights // Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBic2009). 2009. P. 210–214.

14. Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization // Studies in Computational Intelligence. 2010. Vol. 284. P. 65–74.

15. Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2013 Special Session on Real-Parameter Optimization : Technical Report / J. J. Liang [et al.]; Computational Intelligence Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou China, and Technical Report / Nanyang Technological University. Singapore, 2012.

16. Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms // Computer methods in applied mechanics and engineering. 2000. Vol. 186 (2–4). P. 311–338.

17. Liang J. J., Shang Z., Li Z. Coevolutionary Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer // Proceedings of Congress on Evolutionary Computation (CEC'2010). 2010. P. 1505–1512.

18. Mallipeddi R., Suganthan P. N. Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2010 Competition on Constrained Real-Parameter Optimization : Technical report / Nanyang Technological University. Singapore, 2009.

19. Frank A., Asuncion A. UCI Machine Learning Repository. Irvine, CA : University of California, School of Information and Computer Science, 2010. URL: http://archive.ics.uci.edu/ml.

20. Huang J.-J., Tzeng G.-H., Ong Ch.-Sh. Two-stage genetic programming (2SGP) for the credit scoring model // Applied Mathematics and Computation. 2006. Vol. 174. P. 1039–1053.

21. Marcano-Cedeno A., Quintanilla-Domínguez J., Andina D. WBCD breast cancer database classification applying artificial metaplasticity neural network // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38, iss. 8. P. 9573–9579.

22. Temurtas H., Yumusak N., Temurtas F. A comparative study on diabetes disease diagnosis using neural networks // Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36, No. 4. P. 8610–8615.

© Akhmedova Sh. A., Semenkin E. S., 2015

UDC 519.87

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 28–34

ROBUST AND RELIABLE TECHNIQUES FOR SPEECH-BASED EMOTION RECOGNITION

C. Yu. Brester[1*], O. E. Semenkina[1], M. Yu. Sidorov[2]

[1]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
[2]Ulm University
43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany
[*]E-mail: christina.bre@yandex.ru

One of the crucial challenges related to the spacecraft control is the monitoring of the mental state of crew members as well as operators of the flight control centre. In most cases, visual information is not sufficient, because spacemen are trained to cope with feelings and not to express emotions explicitly. In order to identify the genuine mental state of a crew member, it is reasonable to engage the acoustic characteristics obtained from speech signals presenting voice commands during the spacecraft control and interpersonal communication. Human emotion recognition implies flexible algorithmic techniques satisfying the requirements of reliability and fast operation in real time. In this paper we consider the heuristic feature selection procedure based on the self-adaptive multi-objective genetic algorithm that allows the number of acoustic characteristics involved in the recognition process to be reduced. The effectiveness of this approach and its robustness property are revealed in experiments with various classification models. The usage of this procedure leads to a reduction of the feature space dimension by a factor of two (from 384 to approximately 180 attributes), which means decreasing the time resources spent by the recognition algorithm. Moreover, it is proposed to implement some algorithmic schemes based on collective decision making by the set of classifiers (Multilayer Perceptron, Support Vector Machine, Linear Logistic Regression) that permits the improvement of the recognition quality (by up to 10% relative improvement). The developed algorithmic schemes provide a guaranteed level of effectiveness and might be used as a reliable alternative to the random choice of a classification model. Due to the robustness property the heuristic feature selection procedure is successfully applied on the data pre-processing stage, and then the approaches realizing the collective decision making schemes are used.

Keywords: emotion recognition, adaptive multi-objective genetic algorithm, classifier, collective decision making.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 28–34

РОБАСТНЫЕ И НАДЕЖНЫЕ ПОДХОДЫ К РАСПОЗНАВАНИЮ ЭМОЦИЙ ПО РЕЧИ

К. Ю. Брестер[1*], О. Э. Семенкина[1], М. Ю. Сидоров[2]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Ульмский университет
Германия, 89081, г. Ульм, аллея им. Альберта Эйнштейна, 43
[*]E-mail: christina.bre@yandex.ru

Контроль психоэмоционального состояния членов экипажа космического корабля, а также операторов центра управления полетами является одной из ключевых задач, требующих решения в онлайн-режиме. Нередко визуальный контроль может быть недостаточным, поскольку экипаж обучен владеть собой и не выражать эмоций в явном виде. Для определения более точного психологического портрета возможно использование акустических характеристик речевых сигналов, фиксируемых в ходе управления космическим аппаратом (голосовыми командами) и обычной коммуникации. Распознавание эмоций человека в ходе коммуникации с интеллектуальными диалоговыми системами предполагает наличие гибкого алгоритмического аппарата, отвечающего требованиям надежности и быстродействия при функционировании в режиме реального времени. Рассматривается эвристическая процедура извлечения информативных признаков, позволяющая существенно сократить число акустических характеристик, используемых алгоритмами распознавания. Эффективность данного подхода исследуется в сочетании с различными классификационными моделями, благодаря чему демонстрируется свойство робастности. Применение указанной процедуры позволяет снизить размерность

признакового пространства в два раза (с 384 до приблизительно 180 атрибутов), что сопряжено с сокращением временных ресурсов, затрачиваемых алгоритмом распознавания. Кроме того, было предложено несколько алгоритмических схем, основанных на коллективном принятии решений набором классификаторов, что позволило существенно повысить качество распознавания (приблизительно до 10 % для одной из баз данных). Разработанные алгоритмические схемы обеспечивают гарантированный уровень эффективности и являются надежной альтернативой произвольному выбору классификационной модели. Благодаря свойству робастности, эвристическая процедура отбора информативных признаков была успешно использована на этапе предобработки данных с последующим применением подходов, реализующих механизмы коллективного принятия решений.

Ключевые слова: распознавание эмоций, адаптивный многокритериальный генетический алгоритм, классификатор, коллективное принятие решений.

Introduction. During monitoring of the spacecraft flight, it is essential to assess the astronaut abilities to provide the reliable control with sober mind. In most cases, instability of the emotions state may prevent the crew from making a right decision. Moreover, the usage of visual information is likely to be less relevant for this purpose because astronauts are trained to hide their genuine emotions and keep calm explicitly. Therefore, it is reasonable to recognize their emotional state based on speech signals, in particular, based on voice commands while operating with the spacecraft and interpersonal communication.

Although many good results have already been achieved in the sphere of emotion recognition, there are a number of open questions. Some of them are about the development of effective classification methods that should be applied to this problem [1]. Others pertain to extracting acoustic characteristics from speech signals [2; 3] or selecting the set of relevant features from databases [4].

At the "INTERSPEECH 2009 Emotion Challenge" an appropriate set of acoustic characteristics used to describe any speech signal was introduced. This set of features, comprising attributes such as pitch, intensity and formants, is high-dimensional: the number of characteristics is 384. For most classifiers it is extremely difficult to make a decision based on all this input data: features might have a low variation level, correlate with each other or be measured with mistakes.

Background. During experiments it was revealed that the usage of the standard feature selection procedures (such as Principal Component Analysis (PCA)) led to the classification accuracy decreasing [5]. Therefore, to oppose this, some heuristic techniques based on the multi-objective genetic algorithm were developed.

Two main schemes of dimension reduction are realized normally to determine the relevant feature set [6]. According to the first one, it is compulsory to evaluate the effectiveness of the selected attributes with any classification model (the *wrapper* approach). The second method requires some metrics (Attribute Class Correlation, Inter- and Intra- Class Distances, Laplasian Score, Representation Entropy and the Inconsistent Example Pair measure) to be estimated and it ignores the classifier performance entirely (the *filter* approach) [7]. The details of the presented schemes and criteria introduced are described in [8].

As the feature search procedure we implement the Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) [9] based on the Pareto dominance idea (fig. 1). It operates with a set of binary strings coding the informative features in the following way: *unit* corresponds to the relevant attribute whereas *zero* denotes the irrelevant one.

SPEA uses the outer set to preserve non-dominated solutions and genetic operators to produce new candidate solutions. Furthermore, to avoid choosing the algorithm settings we suggest applying the self-adaptive modification of SPEA. Originally, tournament selection is used; therefore only crossover and mutation should be adjusted.

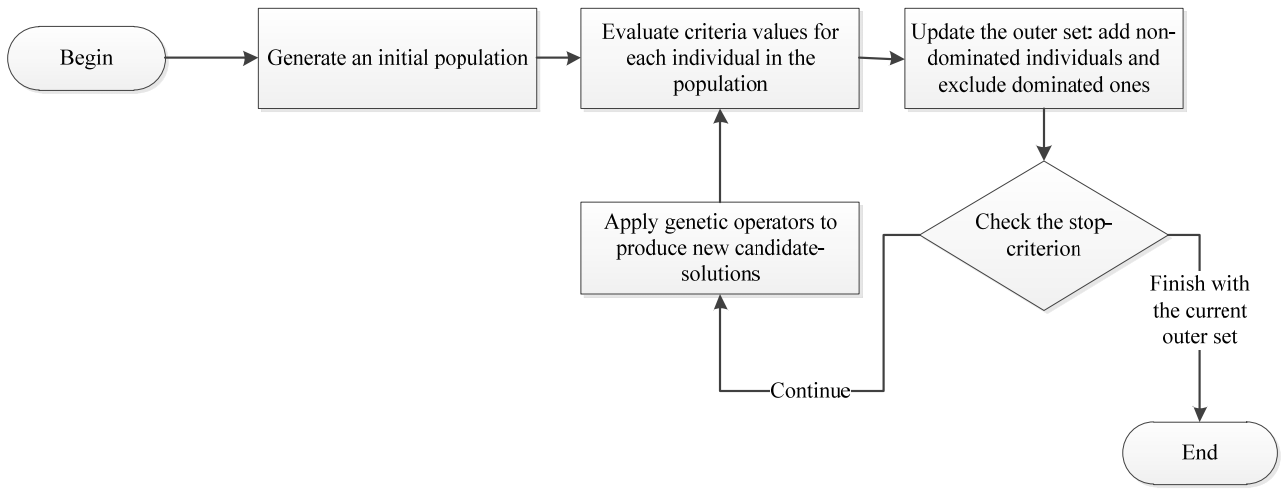


Fig. 1. The general scheme of the SPEA algorithm

We realize the self-configurable recombination operator based on the co-evolution idea [10]: the population is divided into parts and each part is derived with a particular type of crossover that is conventionally one-point, two-point or uniform. We also estimate the fitness value for each variant of recombination that implies the number of non-dominated individuals generated with it. Based on these rates, resources are reallocated in every *T*-generation. The self-adaptive mutation operator is based on the idea proposed by Daridi [11]. At every generation mutation probability is recalculated according to the heuristic rule.

The research conducted [8] has exposed that the filter approach permits the achievement of better results in the sense of classification accuracy, whereas the usage of the wrapper approach decreases the number of features significantly.

Due to the independency of the filter approach from classification models it might be supposed that this feature selection procedure should be rather effective in combination with various classifiers. Therefore in this paper we explore the *robustness property* of the filter technique. In other words, it is necessary to consider a number of classification models and check whether this method is effective for most of them or not.

Moreover, it is hardly ever possible for the online dialogue systems to vary classifiers and determine the most effective one while interacting with a user. Consequently, some general approaches based on involving different models should be elaborated. In this research we propose three schemes of taking into account predictions of different classifiers and producing the collective decision. The effectiveness of these algorithmic schemes is investigated on both baseline and reduced feature sets of emotion recognition problems.

Databases description. In the study a number of speech databases have been used and this section provides their brief description.

The *Berlin* emotional database [12] was recorded at the Technical University of Berlin and consists of labelled emotional German utterances which were spoken by 10 actors (5 female). Each utterance has one of the following emotional labels: neutral, anger, fear, joy, sadness, boredom or disgust.

The *VAM* database [13] was created at Karlsruhe University and consists of utterances extracted from the popular German talk-show “Vera am Mittag” (Vera in the afternoon). The emotional labels of the first part of the corpus (speakers 1–19) were given by 17 human evaluators and the rest of the utterances (speakers 20–47) were labelled by 6 annotators on a 3-dimensional emotional basis (valence, activation and dominance). To produce the labels for the classification task we have used just a valence (or evaluation) and an arousal axis. The corresponding quadrant (anticlockwise, starting in the positive quadrant, and assuming arousal as abscissa) can also be assigned emotional labels: happy-exciting, angry-anxious, sad-bored and relaxed-serene.

The *UUDB* (The Utsunomiya University Spoken Dialogue Database for Paralinguistic Information Studies) database [14] consists of spontaneous Japanese human-human speech. The task-oriented dialogue produced by seven pairs of speakers (12 female) resulted in 4.737 utterances in total. Emotional labels for each utterance were created by three annotators on a five-dimensional emotional basis (interest, credibility, dominance, arousal, and pleasantness). For this work, only pleasantness (or evaluation) and the arousal axes are used.

There is a statistical description of the corpora used in tab. 1.

Robustness of the filter approach. The robustness property of the filter approach was investigated using a set of conventional classification models: Multilayer Perceptron (MLP), Support Vector Machine (SVM), Linear Logistic Regression (Logit), Radial Basis Function network (RBF), Naive Bayes, Decision trees (J48), Random Forest, Bagging, Additive Logistic Regression (LogitBoost) and One Rule (OneR) [15].

For each classifier the *F-score* [16] was evaluated, first, on the baseline data set and, secondly, on the set of features selected by SPEA. Also the relative F-score improvement and the average number of extracted attributes were estimated. We implemented a 6-fold cross-validation procedure. For all of the corpora SPEA was provided with an equal number of resources (for each run 10100 candidate solutions were examined in the search space).

The results obtained are presented in tab. 2. The average number of selected features is equal to: Berlin – 182.2, VAM – 178.7, UUDB – 179.2.

Based on the experimental results we may conclude that there is no classification model which provides a lower F-score value for all of the corpora after the feature selection procedure. Moreover, for example, the *Decision Trees* model (J48) demonstrates improvement of the F-score in all of the experiments. Obviously, in some cases the dimension reduction is achieved at the detriment of the classifier performance.

Besides, there is no particular model that is equally effective for all of the databases. We may notice that F-score values vary significantly for different classifiers. Even the best model for a certain database might be the worst for another one. For instance, MLP demonstrates the highest performance on the Berlin corpus, whereas for the UUDB database it achieves the worst results (and vice versa, for the One Rule classifier). Therefore it might be reasonable to involve a number of classifiers in the decision making process in order to increase the reliability of the classification technique. Otherwise, the random choice of the classifier may lead to significant performance deterioration.

Table 1

Statistical description of the corpora used

Database	Language	Full length, min.	Number of emotions	File level duration		Notes
				Mean, sec.	Std., sec.	
Berlin	German	24.7	7	2.7	1.02	Acted
VAM	German	47.8	4	3.02	2.1	Non-acted
UUDB	Japanese	113.4	4	1.4	1.7	Non-acted

The next section contains a description of the algorithmic schemes that compose the final prediction based on decisions of a number of classifiers.

Collective decision making in the emotion recognition procedure. In this research we investigate the efficiency of three techniques that allow the predictions of different classifiers to be taken into account while making the final decision [17].

Scheme 1. For each test example it is necessary to determine k-nearest neighbours from the training data set. The prediction of the model that classifies these k-nearest neighbours correctly is used as the final decision. (If several models demonstrate equal effectiveness, choose one of them randomly).

Scheme 2. For each test example the engaged models vote for different classes according to their own predictions. The final decision is defined as a collective choice based on the majority rule.

Scheme 3. The previous scheme has one disadvantage: if the number of classes is greater than or equal to the number of classifiers involved (or the number of classifiers is even), a situation whereby several classes get the majority of votes often occurs. Therefore we combine Schemes 1 and 2 in the following way (fig. 2):

– fulfil the voting procedure as it is described in Scheme 2;

– if several classes have the maximum number of votes, apply Scheme 1.

In all these schemes there is no limitation to the number of classifiers.

Table 2

Experimental results for conventional classifiers

	Berlin			VAM			UUDB		
	F-score, %		Gain, %	F-score, %		Gain, %	F-score, %		Gain, %
	Baseline	SPEA		Baseline	SPEA		Baseline	SPEA	
MLP	**82.87**	**82.26**	–0.74	41.08	**43.05**	4.80	25.48	34.58	35.71
SVM	81.71	82.14	0.53	43.57	36.92	–15.26	35.59	33.04	–7.15
Logit	80.04	82.15	2.64	36.88	37.88	2.71	36.72	36.33	–1.06
RBF	68.93	71.59	3.85	37.87	34.47	–8.97	26.75	23.60	–11.77
Naive Bayes	66.91	67.45	0.81	40.86	42.33	3.60	36.52	36.45	–0.20
J48	50.15	51.96	3.60	36.20	37.70	4.17	38.70	**42.64**	10.18
Random Forest	54.69	73.43	34.27	**45.66**	37.08	–18.79	40.11	36.56	–8.84
Bagging	60.60	63.29	4.43	37.24	36.67	–1.54	40.94	37.08	–9.42
Logit Boost	66.66	71.21	6.82	40.06	36.14	–9.80	41.28	37.17	–9.96
OneR	29.20	29.20	0.00	33.34	33.34	0.00	**41.92**	41.56	–0.85

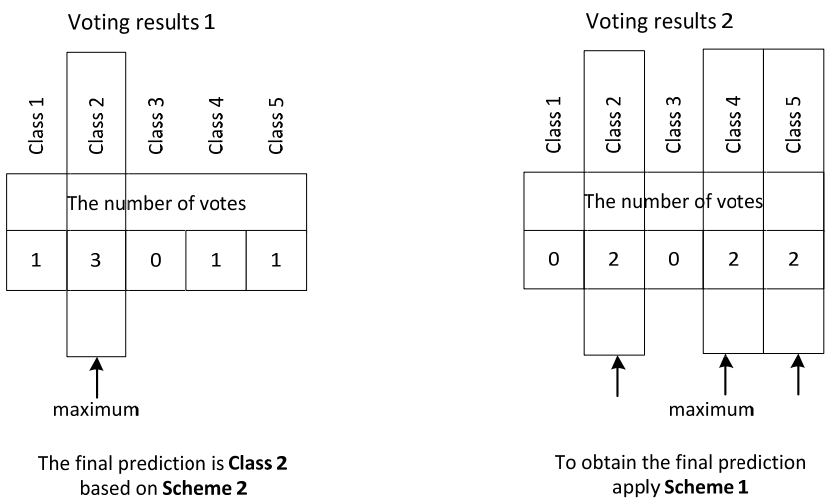


Fig. 2. An example how Scheme 3 works

Table 3

Experimental results for collective decision making schemes

	Baseline feature set			Reduced feature set		
	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3
Berlin	81.18	84.01	**84.23**	79.91	**82.54**	**82.54**
VAM	42.29	**50.19**	43.69	37.99	**39.18**	**39.18**
UUDB	37.96	36.41	**39.78**	**40.43**	34.99	35.19

Analysis of the results presented in tab. 2 showed that for the used corpora Multilayer Perceptron (MLP), Support Vector Machine (SVM) and Linear Logistic Regression (Logit) demonstrated rather high performance. Therefore it was decided to involve these classifiers in the proposed schemes of collective decision making.

We investigated the effectiveness of the developed schemes on the baseline feature set and on the set of attributes selected by SPEA (due to the robustness property of the feature selection procedure, it is also reasonable to apply these schemes including a number of models to the reduced feature set). Tab. 3 contains the F-score values obtained during the 6-fold cross-validation procedure for all of the corpora.

Based on the experimental results it might be concluded that on the set of presented databases Scheme 3 is effective for the collective classification process on the full data set as well as after the feature selection procedure.

On the Berlin database (fig. 3) all schemes demonstrate high performance. The F-score values obtained with the usage of Schemes 2 and 3 even outperform the best results achieved by MLP on the full and reduced feature sets.

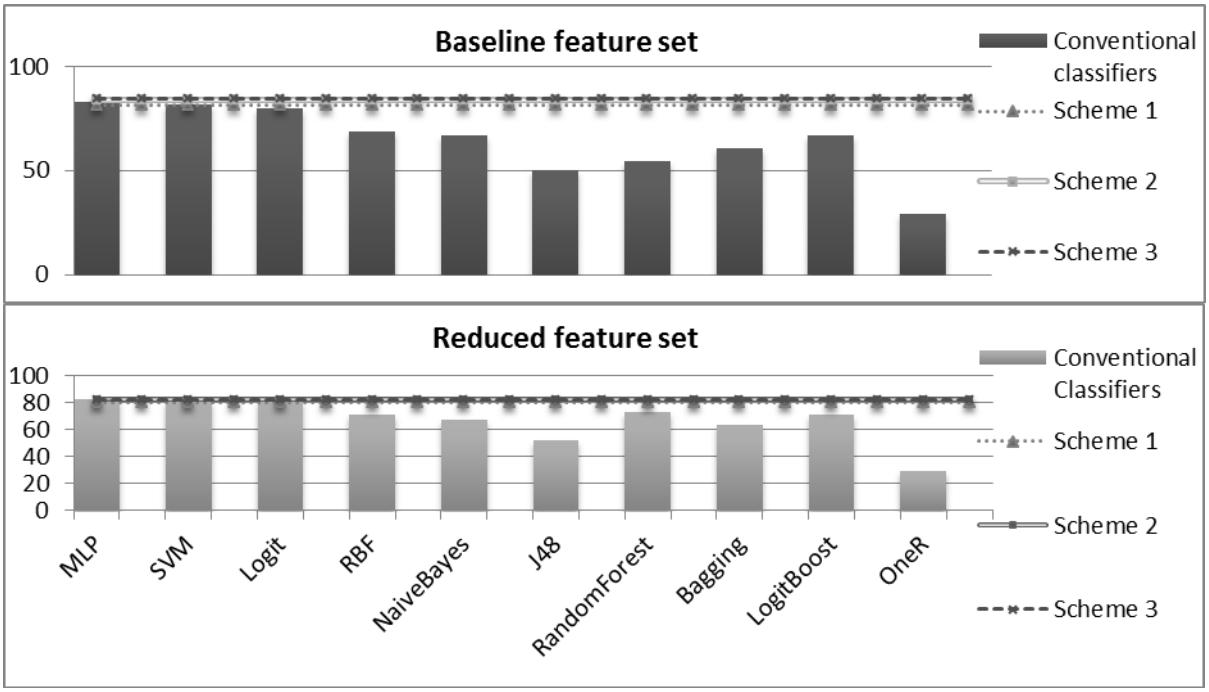


Fig. 3. Classification results for *Berlin*

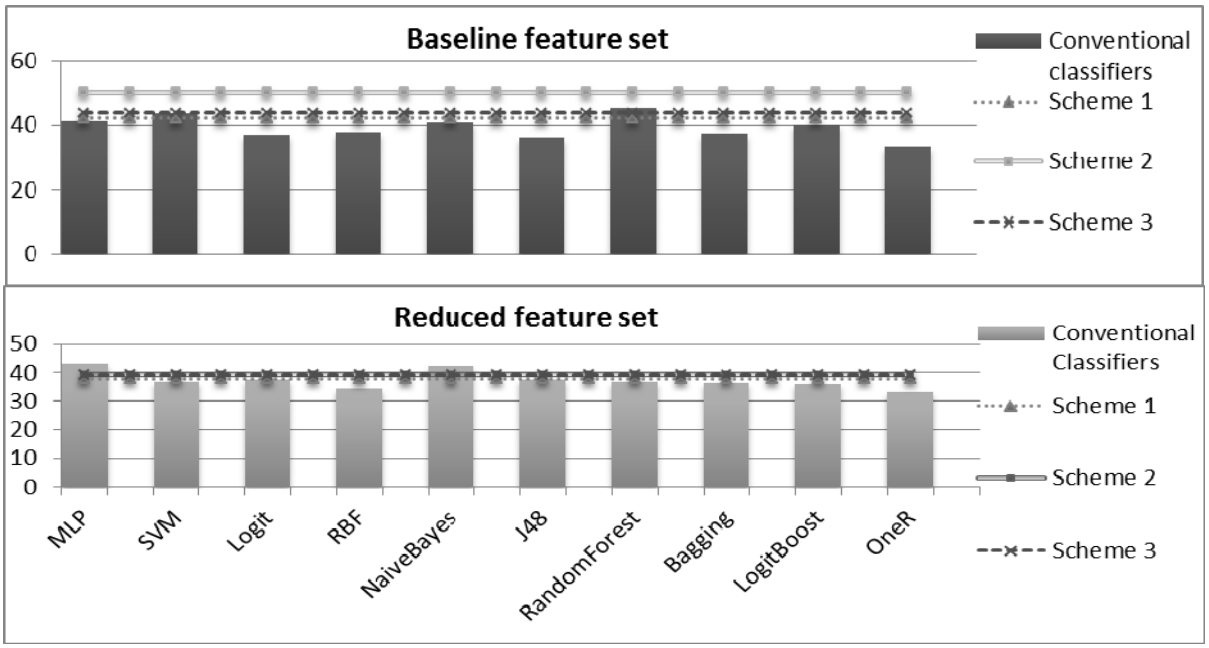


Fig. 4. Classification results for *VAM*

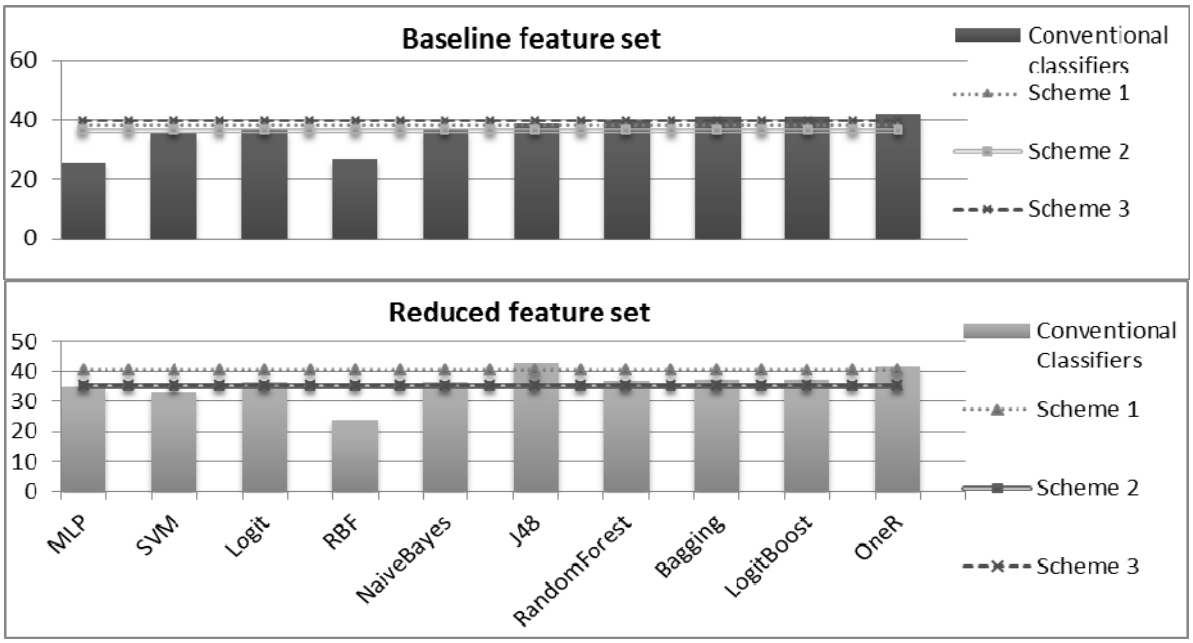


Fig. 5. Classification results for *UUDB*

In most cases the F-score values achieved by any collective decision making scheme are comparable with the best results provided by the most effective models or, at least, higher than the average F-score value obtained by conventional classifiers.

The best classification results on the VAM corpus (fig. 4) provided by Random Forest on the baseline feature set were exceeded by the application of Scheme 2 (9.93 % relative improvement). It is essential to take into account that in this case the most effective classification model (Random Forest) is not involved in the set of classifiers used in the framework of Scheme 2 (MLP, SVM, Linear Logistic Regression). Nevertheless, we attained a significantly better result with classifiers that demonstrated average effectiveness on this corpus.

Even on the UUDB corpus we obtained rather high F-score values (fig. 5), although MLP, SVM and Linear Logistic Regression demonstrated the worst results separately.

Conclusions. In this paper some effective approaches to the emotion recognition problem based on heuristic feature selection and collective decision making are considered. Due to the usage of these techniques it became possible to improve the classification results for most of the corpora (in some cases even by up to 10 % relative improvement) and, moreover, to reduce the number of features involved in the classification procedure significantly (from 384 to approximately 180).

The conducted experiments also exposed that the proposed schemes of collective choice might be effectively applied to the full data set as well as to the reduced one (after feature selection).

Although we managed to achieve some good results, there are a number of questions. The first one is related to the feature selection technique, in particular, to the introduced criteria: *whether it is reasonable to take into consideration other criteria (Laplasian Score, Representation Entropy and the Inconsistent Example Pair measure) or not? Should we engage the information about the classifier performance into the heuristic search on the stage of feature selection or ignore it totally to maintain the robustness of this approach?*

Other questions pertain to the classification models involved in the collective decision making process: *how many classifiers should we use to provide the most reliable scheme? What kind of models should it be compulsory to include in the ensemble of classifiers?*

These crucial questions will have to be elaborated in the next paper.

Acknowledgment. The research is performed with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the federal R&D program (project RFMEFI57414X0037).

Благодарности. Исследование выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП ИР (проект RFMEFI57414X0037).

References

1. Sidorov M., Ultes S., Schmitt A. Emotions are a personal thing: Towards speaker-adaptive emotion recognition. *ICASSP*, 2014, p. 4803–4807.

2. Eyben F., Wöllmer M., and Schuller B. Opensmile: the munich versatile and fast opensource audio feature extractor. *Proceedings of the international conference on Multimedia*, 2010. ACM, p. 1459–1462.

3. Boersma P. Praat, a system for doing phonetics by computer. *Glot international,* 2002, no. 5(9/10), p. 341–345.

4. Sidorov M., Brester C., Minker W., Semenkin E. Speech-Based Emotion Recognition: Feature Selection by Self-Adaptive Multi-Criteria Genetic Algorithm. *LREC*, 2014, p. 3481–3485.

5. Brester C., Semenkin E., Sidorov M., Minker W. Self-adaptive multi-objective genetic algorithms for feature selection. *Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i'14)*, 2014, p. 1838–1846.

6. Kohavi R., John G. H. Wrappers for feature subset selection. *Artificial Intelligence,* 97, 1997, p. 273–324.

7. Venkatadri M., Srinivasa Rao K. A multiobjective genetic algorithm for feature selection in data mining. I*nternational Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2010, vol. 1, no. 5, p. 443–448.

8. Brester C., Sidorov M., Semenkin E. Acoustic Emotion Recognition: Two Ways of Features Selection Based on Self-Adaptive Multi-Objective Genetic Algorithm. *Proceedings of the International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, 2014, p. 851–855.

9. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on,* 1999, vol. 3, no. 4, p. 257–271.

10. Sergienko R., Semenkin E. Competitive Cooperation for Strategy Adaptation in Coevolutionary Genetic Algorithm for Constrained Optimization. *IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'2010),* Barcelona, Spain, 2010, p. 1626–1631.

11. Daridi F., Kharma N., and Salik, J. Parameterless genetic algorithms: review and innovation. *IEEE Canadian Review*, 2004, no. (47), p. 19–23.

12. Burkhardt F., Paeschke A., Rolfes M., Sendlmeier W. F., and Weiss B. A database of german emotional speech. *In Interspeech,* 2005, p. 1517–1520.

13. Grimm M., Kroschel K., and Narayanan S. The vera am mittag German audio-visual emotional speech database. *In Multimedia and Expo, IEEE International Conference on*, IEEE, 2008, p. 865–868.

14. Mori H., Satake T., Nakamura M., and Kasuya H. Constructing a spoken dialogue corpus for studying paralinguistic information in expressive conversation and analyzing its statistical/acoustic characteristics. *Speech Communication*, 2011, 53 p.

15. Hall M., Frank E., Holmes G., Pfahringer B., Reutemann P., Witten I. H. The WEKA Data Mining Software: An Update, *SIGKDD Explorations*, 2009, vol. 11, Iss. 1.

16. Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and *F*-score, with implication for evaluation. *ECIR'05 Proceedings of the 27th European conference on Advances in Information Retrieval Research*, 2005, p. 345–359.

17. Popov E. A., Semenkina M. E., Lipinskiy L. V. [Decision making with intelligent information technology ensemble]. *Vestnik SibGAU.* 2012, no. 5 (45), p. 95–99 (In Russ).

Библиографические ссылки

1. Sidorov M., Ultes S., Schmitt A. Emotions are a personal thing: Towards speaker-adaptive emotion recognition // ICASSP. 2014. P. 4803–4807.

2. Eyben F., Wöllmer M., Schuller B. Opensmile: the munich versatile and fast opensource audio feature extractor // Proceedings of the Intern. Conf. on Multimedia. ACM. 2010. P. 1459–1462.

3. Boersma P. Praat, a system for doing phonetics by computer // Glot international. 2002. № 5(9/10). P. 341–345.

4. Speech-Based Emotion Recognition: Feature Selection by Self-Adaptive Multi-Criteria Genetic Algorithm / M. Sidorov [et al.] // LREC. 2014. P. 3481–3485.

5. Self-adaptive multi-objective genetic algorithms for feature selection / C. Brester [et al.] // Proceedings of Intern. Conf. on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i'14). 2014. P. 1838–1846.

6. Kohavi R., John G. H. Wrappers for feature subset selection // Artificial Intelligence. 1997. 97. P. 273–324.

7. Venkatadri M., Srinivasa Rao K. A multiobjective genetic algorithm for feature selection in data mining // International J. of Computer Science and Information Technologies. 2010. Vol. 1, no. 5. P. 443–448.

8. Brester C., Sidorov M., Semenkin E. Acoustic Emotion Recognition: Two Ways of Features Selection Based on Self-Adaptive Multi-Objective Genetic Algorithm // Proceedings of the Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). 2014. P. 851–855.

9. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach // Evolutionary Computation, IEEE Transactions on. 1999. Vol. 3, no. 4. P. 257–271.

10. Sergienko R., Semenkin E. Competitive Cooperation for Strategy Adaptation in Coevolutionary Genetic Algorithm for Constrained Optimization // IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'2010). Barcelona, 2010. P. 1626–1631.

11. Daridi F., Kharma N., Salik J. Parameterless genetic algorithms: review and innovation // IEEE Canadian Review. 2004. № 47. P. 19–23.

12. A database of german emotional speech / F. Burkhardt [et al.] // In Interspeech. 2005. P. 1517–1520.

13. Grimm M., Kroschel K., Narayanan S. The vera am mittag german audio-visual emotional speech database // In Multimedia and Expo, IEEE Intern. Conf. on, IEEE. 2008. P. 865–868.

14. Constructing a spoken dialogue corpus for studying paralinguistic information in expressive conversation and analyzing its statistical/acoustic characteristics / H. Mori [et al.] // Speech Communication. 2011. 53 p.

15. The WEKA Data Mining Software: An Update, SIGKDD Explorations / M. Hall [et al.]. 2009. Vol. 11, iss. 1.

16. Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation // ECIR'05 Proceedings of the 27th European conference on Advances in Information Retrieval Research. 2005. P. 345–359.

17. Попов Е. А., Семенкина М. Е., Липинский Л. В. Принятие решений коллективом интеллектуальных информационных технологий // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 95–99.

© Brester C. Yu., Semenkina O. E., Sidorov M. Yu., 2015

УДК 621.833.12

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 35–40

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ МЕХАНИЗМОВ ПРИВОДОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д. В. Вавилов[1*], Р. С. Лукин[1], В. И. Усаков[2]

[1]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]ОАО «ЦКБ «Геофизика»
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, ул. Киренского, 89
[*]E-mail: dvavilov@sfu-kras.ru

Исследования характеристик зубчатых передач различного назначения на этапе проектирования позволяют оценить качество принимаемых проектных решений. В рамках стандартной методики проектирования, основанной на государственных стандартах, зачастую не удается найти оптимального проектного решения. Наиболее остро данная проблема возникает при проектировании высокоточных приводных систем на основе использования волновой зубчатой передачи в качестве выходного звена приводов для нужд военно-космической промышленности. Представлена методика проектирования зубчатых передач на основе выбора геометрических параметров передачи и анализа ее характеристик методом конечных элементов. В рамках исследования крутильной жесткости волновой зубчатой передачи представлены графики зависимости угла поворота гибкого колеса относительно волнового генератора в зависимости от выходного момента. Для цилиндрических передач, входящих в состав приводов космических аппаратов в качестве быстроходных и промежуточных ступеней, выполнена оценка влияния выбранных геометрических параметров на точность и нагрузочную способность передачи. Проведен обзор современных способов изготовления зубчатых колес, спроектированных по предлагаемой методике с использованием средств быстрого прототипирования. Представлены результаты пробной печати средствами быстрого прототипирования мелкомодульного цилиндрического зубчатого колеса с эвольвентным профилем, выполненных из нержавеющей стали и оксида титана. По этим данным сделаны выводы, что современный уровень развития печати не позволяет получать качество боковой поверхности зубьев, необходимое для высокоточных приводных систем специального назначения. Полученные результаты можно рекомендовать для применения при проектировании многоступенчатых редукторов. Применение методов конечных элементов позволит получить наглядную картину распределения напряжений и деформаций элементов привода на этапе проектирования. Представленная методика наряду с современными способами технологической реализации передачи позволяет не только проектировать прецизионные приводные механизмы специального назначения для нужд военно-промышленного комплекса или космической отрасли, но также она применима для анализа широкого спектра передач общего машиностроения.

Ключевые слова: зубчатая передача, волновая зубчатая передача, метод конечных элементов, методика проектирования, быстрое прототипирование, исходный контур.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 35–40

METHOD OF DESIGNING GEAR DRIVE MECHANISM OF DIFFERENT PURPOSE

D. V. Vavilov[1*], R. S. Lukin[1], V. I. Usakov[2]

[1]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2] CDB “Geophysics”
89, Kirenskiy Str., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[*]E-mail: dvavilov@sfu-kras.ru

Different purposes gears characteristics studies during the design phase make possible to evaluate the design decisions quality. With use of the standard design approach based on state standards it is often unable to find the optimal design solution. The major problem occurs in the high-precision drive systems design based on the use of the wave gear drive as a drive output unit for the military and aerospace industry needs. In the paper a gears design

methodology based on transmission geometric parameters selection and its characteristics analysis with finite element method was presented. Within the framework of wave gear torsional stiffness study, the wheel rotation angle relative to the flexible wave generator according vs. output torque diagram was presented. For cylindrical gears as a component of spacecraft drive as a fast and intermediate stage, impact assessment of selected geometric parameters on the transmission accuracy and load capacity was estimated. A modern manufacture methods review of gears designed by the proposed method with the use of rapid prototyping was present. The trial print results by means of rapid prototyping fine-grained spur gear with involute profile, made of stainless steel and titanium oxide was present. The current level 3d printing development can't be obtained a quality of teeth side surface is required for special application high-precision drive systems. The overhaul results can be recommended for use in multi-stage gear units designing. The finite element methods usage will provide a visual stresses and strains distribution diagram of drive components at the design stage. The presented technique along with modern methods of gear technological implementation allows you to design not only the precision actuators for special purposes, for the needs of the military-industrial complex or the space industry, but also be used to analyze a wide range of general engineering programs.

Keywords: gear, harmonic drive, finite element method, the method of design, rapid prototyping, the original contour.

Введение. Развитие машиностроения в значительной степени определяется уровнем совершенства передаточных механизмов, которые широко используются в различных машинах и приборах. Известно, что из передаточных механизмов наиболее распространены зубчатые передачи, вследствие следующих преимуществ: жёсткая кинематическая связь между входным и выходным звеньями, устойчивость к высоким нагрузкам, надежность и др.

Создание зубчатых пар, отвечающих высокому научно-техническому и производственному уровню, требует совместного рассмотрения всех показателей качества проектируемой передачи, а также конструктивных и технологических путей их обеспечения, с учетом экономических ограничений. Качество зубчатых пар закладывается при проектировании и конструировании, обеспечивается технологическим уровнем производства, реализуется в процессе эксплуатации. Такая постановка проблемы позволяет считать ключевым этап проектирования, где необходимо с требуемой точностью оценивать качество синтезируемой пары, используя достаточный минимум показателей.

Различное назначение приводных систем формирует приоритетный набор показателей, которые необходимо учитывать при синтезе геометрии зубчатой пары. Очевидно, что для кинематических передач приоритетными будут являться точностные показатели (кинематическая точность, плавность, погрешность шага), а для тяжело нагруженных – прочностные (контактная, изгибная выносливость и т. д.).

Существующие методики проектирования, основанные на государственных стандартах, не могут в полной мере охватить весь спектр потребностей и технологических возможностей современного производства, в частности при изготовлении приводов специального назначения. Современный уровень развития информационных технологий, совершенствование расчетов конструкций методом конечных элементов привели к созданию программных комплексов, позволяющих анализировать напряженно-деформированное состояние элементов конструкций на этапе проектирования. Использование подобных программных продуктов сопровождается высокими затратами вычислительных ресурсов и времени, следовательно, целесообразно главным образом для приводов специального назначения, например, для высокоточной механики механизмов спутниковых систем, а именно, механизма поворота антенны на основе использования волновой зубчатой передачи (ВЗП) [1–3].

Методика проектирования ВЗП концептуально разделена на две части. Первая часть – синтез геометрии передачи, вторая – анализ кинематических и прочностных характеристик при помощи средств компьютерного моделирования (рис. 1). Для решения задачи контактного взаимодействия зубчатой пары необходимо генерировать геометрию зубчатых колес на основе использования уравнений огибающих непосредственно в CAE-пакетах либо позволять экспортировать полученную геометрию в универсальные форматы 3D-моделей, например Parasolid, STEP, IGES.

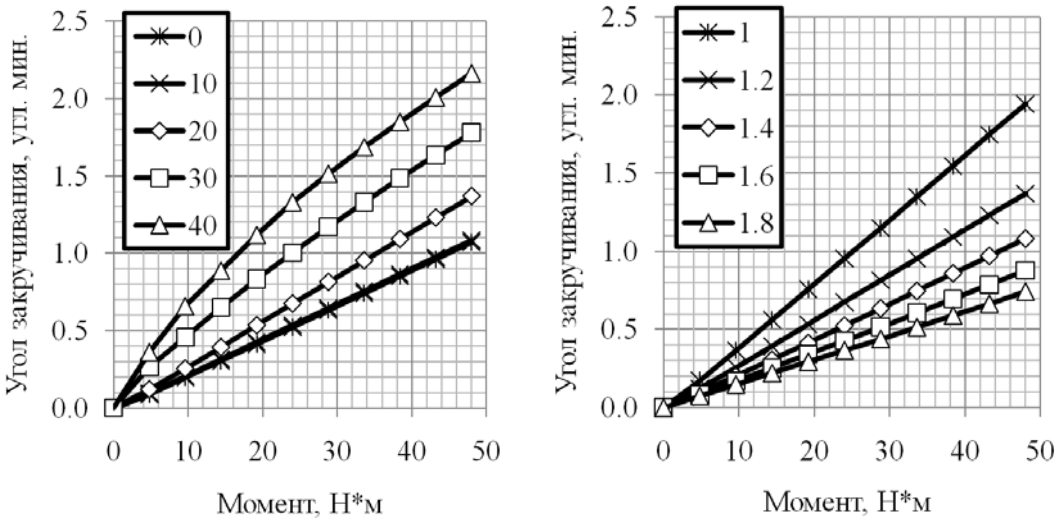
Необходимость поиска значений контактных давлений в зоне зацепления связана, прежде всего, с анализом процесса износа зубьев – одной из основных причин выхода из строя ВЗП по причине потери точности. Поиск скоростей величины скольжения в зоне контакта связан с дифференцированием уравнения профиля кулачка генератора, эта задача математическая и не требует серьезных вычислительных ресурсов. Поиск контактных давлений связан с построением модели плоского зацепления гибкого и жесткого колес. При этом ГК должно быть предварительно деформировано до рабочего состояния с помощью кулачка, что обеспечивает правильность оценки напряжений во впадине зуба. Форма кулачка также может быть управляющим параметром [4; 5], влияющим на концентрацию напряжения в ГК, а также распределение контактных давлений.

Использование аналитических зависимостей позволяет выбирать основные параметры передачи еще на начальном этапе с использованием критериальных или экспертных оценок [6; 7]. Главную трудность здесь представляет выбор конструктивных параметров в условиях использования стандартного инструмента и оборудования для производства зубчатых колес. Поэтому на первом этапе проектирования выбор чисел зубьев и модуля при рассчитанном потребном диаметре ГК осуществляется чаще с использованием экспертной оценки (учитывает опыт производства и эксплуатации) [8]. Использование методов конечных элементов (МКЭ) позволяет обосновать

выбор коэффициентов смещения и форму профиля кулачка по полученной зоне зацепления и значению контактных давлений при различных удельных нагрузках [9]. Также немаловажной задачей является выбор формы ГК, при этом используются разные подходы при проектировании передачи со «стаканом» или коротким ГК. Для короткого ГК производится оценка с использованием МКЭ, депланации его сечения под действием сил в зацеплении; при этом учитывается зазор в гибком подшипнике. Для «стакана» определяется его радиальная (влияющая на КПД ВЗП) и крутильная податливость, которая в ряде случаев меньше, чем податливость короткого колеса.

Использование МКЭ также позволяет оценить податливость передачи в целом, произведя ее декомпозицию на взаимодействующие элементы. Данный способ обоснования решений по выбору конструкции, например зубчатого колеса или корпуса, все чаще находит распространение в современной отечественной промышленности для анализа высокоточных изделий (привода линейного перемещения станков, системы наведения антенн космической связи) [10; 11]. На рис. 2 представлен анализ влияния различных конструктивных параметров на крутильную податливость ВЗП (срединный диаметр ГК 62 мм).

Рис. 1. Этапы проектирования ВЗП как выходной ступени высокоточного привода космического аппарата: ГК – гибкое колесо; ЖК – жесткое колесо; ПМ – полумуфта



а *б*

Рис. 2. Зависимость угла закручивания ГК ВЗП от момента на выходном валу, угл. мин:
а – варьирование радиальным зазором между внешним кольцом гибкого подшипника и ГК, мкм;
б – варьирование толщиной обечайки ГК в районе нарезания зубьев, мм

Из рис. 2 видно, что влияние зазора между кольцом гибкого подшипника и ГК, который также в некоторой степени учитывает зазоры в самом гибком подшипнике, сильно нелинейно. Зазор менее 10 мкм не приводит к увеличению крутильной жесткости ГК, но приводит к увеличению концентрации напряжений на ГК в зоне контакта с внешним кольцом подшипника. Увеличение толщины обечайки ГК больше определенной величины также неэффективно вследствие роста усилий, необходимых для ее деформации [12].

Методика проектирования ВЗП. Данная методика также применима и для цилиндрических зубчатых передач, нарезанных стандартным или модифицированным инструментом. Для ВЗП с модификацией профиля зубьев описано в работе [13]. Для цилиндрических передач взаимодействие зубьев с несопряженным исходным контуром для прямозубых передач рассмотрено в работе [14], для косозубых передач взаимодействие зубьев с модифицированным профилем – в [10]. Для высокоточных приводов, в состав которых входят цилиндрические зубчатые колеса с относительно невысоким коэффициентом перекрытия, немаловажным этапом становится проверка податливости в различных фазах зацепления.

Для оценки податливости зубчатой передачи в различных фазах зацепления необходимо проводить динамический анализ процесса зацепления шестерни и колеса [15]. Колесо и шестерня расположены на податливых опорах. Анализ проводится для различных значений точности изготовления зубчатых колес и номинального размера. Оценка влияния точности изготовления и приведенного момента на кинематическую погрешность передачи приведена на рис. 3. Поставив задачу анализа износостойкости передачи как оценку изменения потерь в зацеплении, приходим к формуле мгновенных потерь мощности (как произведение динамического коэффициента трения на контактные давления и на скорость скольжения) по высоте зуба шестерни.

Применение современных инструментов анализа на различных этапах проектирования зубчатых передач позволяет спроектировать передачу, отвечающую требованиям заказчика. Комплексная оценка влияния множества показателей на заданные выходные характеристики позволяет оценивать влияние нестандартных проектных решений наравне с общепринятыми (нестандартный исходный контур цилиндрической передачи или кривая деформации ВЗП). Широкие возможности постпроцессинга результата позволяют проводить совместную оценку результатов численного и натурного эксперимента.

Методика проектирования цилиндрических передач. Существенным ограничением спектра использования нестандартных параметров передачи является высокая стоимость изготовления фасонного или модифицированного металлопрофилирующего инструмента. Развитие систем ЧПУ на сегодня позволяет изготавливать крупно- и среднемодульные колеса без применения специализированного зуборезного инструмента, однако изготовление мелкомодульных колес подобными методами невозможно. Тем не менее, наряду с традиционными методами профилирования зубьев резанием, все больше применяется метод формообразования пластическим деформированием – накатка [16]. Развитие технологий 3D-печати позволяет существенно расширить спектр технологических параметров профиля, позволяя отойти от концепции использования стандартного режущего инструмента для изготовления зубчатых колес механизмов приводов. Современные технологии быстрого прототипирования позволяют получать изделия любой формы из различных металлов (рис. 4). Уход от стандартного режущего инструмента позволяет существенно расширить границы управляющих параметров при синтезе оптимальной геометрии профиля. К недостаткам данного метода, который можно объяснить начальным этапом развития технологии, можно отнести высокую стоимость и энергозатраты для получения единичного объема материала, а также невозможность прототипирования на основании сложной формы.

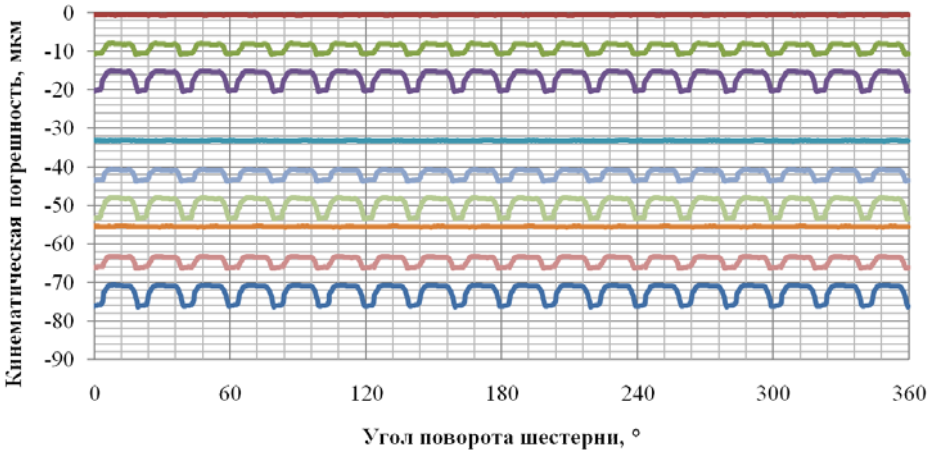
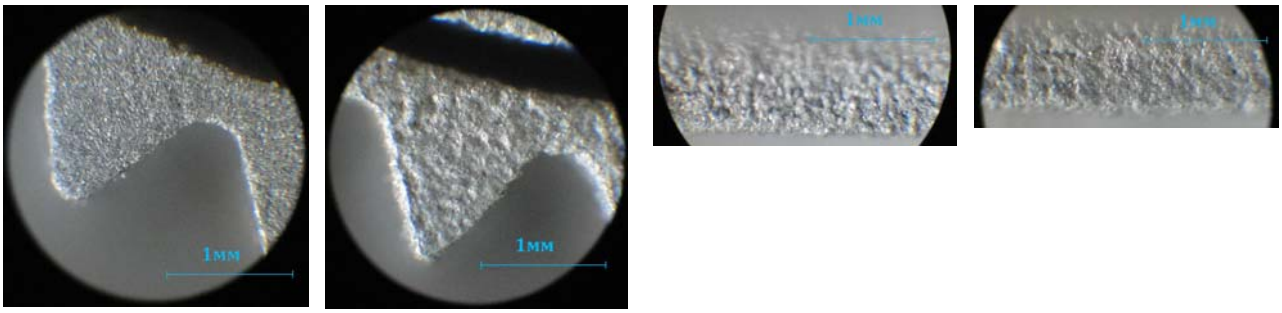


Рис. 3. Кинематическая погрешность, обусловленная моментом, кривые (сверху вниз) соответствуют расчетным случаям: *1* – номинальные размеры, момент 0,2 Н·м; *2* – 10 Н·м; *3* – 20 Н·м; *4* – точность 6Н, момент 0,2 Н·м; *5* – 10 Н·м; *6* – 20 Н·м; *7* – точность 7Н, момент 0,2 Н·м; *8* – 10 Н·м; *9* – 20 Н·м



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Мелкомодульное колесо, изготовленное с использованием технологии 3D-печати. Параметры передачи: модуль 0,5 мм, коэффициент смещения 2, материалы: *а*, *в* – оксид титана; *б*, *г* – нержавеющая сталь

Широкий спектр технологических возможностей для профилирования зубчатых колес механизмов приводов открывает новые возможности при их проектировании. Тем не менее стоит провести анализ целесообразности применения подобных методов при серийном производстве продукции.

Заключение. Представленная методика наряду с современными способами технологической реализации передачи позволяет не только проектировать прецизионные приводные механизмы специального назначения для нужд военно-промышленного комплекса или космической отрасли, но также она применима для анализа широкого спектра передач общего машиностроения.

Библиографические ссылки

1. Tribological aspects of a strain wave gearing system with specific reference to its space application / K. Ueura [et al.] // Journal of Engineering Tribology. 2008. Т. 222. С. 1051–1061.

2. Rhéaume F-E., Champliaud H., Liu Z. Understanding and modelling the torsional stiffness of harmonic drives through finite-element method // Journal of Mechanical Engineering Science. 2009. Т. 223. С. 516–524.

3. Tjahjowidodo T., Al-Bender F., Brussel H. Theoretical modelling and experimental identification of nonlinear torsional behaviour in harmonic drives // Mechatronics. 2013. № 23. С. 497–504.

4. Design and development of strain wave generating cam for a new concept ‘harmonic drive’ / R. Maiti [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Science. 2012. Vol. 227(8). С. 1870–1884.

5. Усаков В. И., Лукин Р. С. Профиль кулачка волнообразователя как управляющий параметр при моделировании волновой зубчатой передачи // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2013. Т. 1. С. 300–301.

6. Люминарский С. Е. Влияние погрешности обката гибкого колеса на кинематическую погрешность ВЗП-80 // Наука и образование. 2012. № 1. С. 1–10.

7. Люминарский С. Е. Определение напряженного состояния гибкого колеса волновой передачи // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 13. С. 17–22.

8. A novel method based on mechanical analysis for the stretch of the neutral line of the flexspline cup of a harmonic drive / C. Xiaoxia [et al.] // Mechanism and Machine Theory. 2014. Vol. 76. С. 1–19.

9. Моделирование взаимодействия звеньев волновых зубчатых передач / Р. С. Лукин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 118–122.

10. Лимаренко Г. Н., Колбасина Н. А., Лукин Р. С. Моделирование параметров конструкции и реечного зацепления привода рабочего органа тяжелого станка // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2(34). С. 25–30.

11. Chen Y-C., Lo C-C. Contact stress and transmission errors under load of a modified curvilinear gear set based on finite element analysis // Journal of Mechanical Engineering Science. 2015. Т. 229, № 2. С. 191–204.

12. Kircanski N. M., Goldenberg A. A. An Experimental Study of Nonlinear Stiffness, Hysteresis, and Friction Effects in Robot Joints with Harmonic Drives and Torque Sensors // The International Journal of Robotics Research. 1997. Vol. 16. С. 214–239.

13. Tesfahunegn Y., Rosa F., Gorla C. The effects of the shape of tooth profile modifications on the transmission error, bending, and contact stress of spur gears // Journal of Mechanical Engineering Science. 2010. Vol. 224. С. 1749–1758.

14. Полиморфизм эвольвентного профиля в задачах проектирования разномодульных зубчатых передач / Р. С. Лукин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 6(46). С. 117–123.

15. Методология компьютерного моделирования зубчатых передач с нормированием показателей точности / Д. В. Вавилов [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4. С. 173–176.

16. Исследование кинематических характеристик цилиндрических прямозубых передач, формообразуемых накатыванием средствами САПР / Д. В. Вавилов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2011. № 1(34). С. 7–10.

References

1. Ueura K. et al. Tribological aspects of a strain wave gearing system with specific reference to its space application. *Journal of Engineering Tribology* 2008, vol. 222, p. 1051–1061.

2. Rhéaume F-E, Champliaud H., Liu Z. Understanding and modelling the torsional stiffness of harmonic drives through finite-element method. *Journal of Mechanical Engineering Science.* 2009, vol. 223, p. 516–524.

3. Tjahjowidodo T., Al-Bender Farid, van Brussel H. Theoretical modelling and experimental identification of nonlinear torsional behaviour in harmonic drives. *Mechatronics.* 2013, no. 23, p. 497–504.

4. Maiti R., Biswas I., Nema V., Basu S., Bhabani S., Routh B. Design and development of strain wave generating cam for a new concept 'harmonic drive'. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012, vol. 227(8), p. 1870–1884.

5. Usakov V. I., Lukin R. S. [Profile of a wave generator cam as a control parameter in the modeling of the wave gear]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"*. [Proceedings of the XVII International Conference "Reshetnev readings"]. 2013, vol. 1, p. 300–301 (In Russ.).

6. Lyuminarskiy S. E. [The impact of rounding errors flexible wheel on kinematic error CDW-80]. *Nauka i obrazovanie*. 2012, no. 1, p. 1–10 (In Russ.).

7. Lyuminarskiy S. E. [Determination of the stress state of the flexible wheel wave transmission.]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. 2012, no. 13, p. 17–22 (In Russ.).

8. Xiaoxia C., Yusheng L., Jingzhong X., Shuzhong L., Ming M. A novel method based on mechanical analysis for the stretch of the neutral line of the flexspline cup of a harmonic drive. *Mechanism and Machine Theory*. 2014, vol. 76, p. 1–19.

9. Lukin R. S., Usakov V. I., Vavilov D. V., Iptyshev A. A. [Modelling the interaction of the wave gear units]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 1 (47), p. 118–122 (In Russ.).

10. Limarenko G. N. Kolbasina N. A. Lukin R. S. [Simulation design parameters and pinion drive engagement working body of heavy machine]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2012, no. 2, p. 25–30 (In Russ.).

11. Chen Y.-C., Lo C.-C. Contact stress and transmission errors under load of a modified curvilinear gear set based on finite element analysis. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015, vol. 229, No. 2, p. 191–204.

12. Kircanski N. M., Goldenberg A. A. An Experimental Study of Nonlinear Stiffness, Hysteresis, and Friction Effects in Robot Joints with Harmonic Drives and Torque Sensors. *The International Journal of Robotics Research*. 1997, vol. 16, p. 214–239.

13. Tesfahunegn Y., Rosa F., Gorla C. The effects of the shape of tooth profile modifications on the transmission error, bending, and contact stress of spur gears. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2010, vol. 224, p. 1749–1758.

14. Lukin R. S., Usakov V. I., Smirnov A. P., Iptyshev A. A., Vavilov D. V. [Polymorphism involute profile in the problems of designing multimodulus gears] *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 6(46), p. 117–123 (In Russ.).

15. Vavilov D. V., Eresko S. P., Iptyshev A. A., Usakov V. I. [The methodology of computer simulation gears with valuation indicators accuracy]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie.* 2011, no. 4, p. 173–176 (In Russ.).

16. Vavilov D. V., Kolegova M., Iptyshev A. A., Eliseev D. B. [Investigation of kinematic characteristics spur gears by rolling shape-generating means CAD]. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 1(34), p. 7–10 (In Russ.).

© Вавилов Д. В., Лукин Р. С., Усаков В. И., 2015

УДК 534.121.1

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 41–45

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ, ШАРНИРНО ЗАКРЕПЛЕННОЙ В ЧЕТЫРЕХ УГЛАХ

П. О. Деев*, А. В. Лопатин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: prokhor777@gmail.com

Трехслойные пластины со свободными краями широко применяются в конструкциях современных космических аппаратов, составляя силовую основу корпусов негерметичного исполнения. Основная частота колебаний трехслойной пластины используется для оценки весовой эффективности конструкции, что важно при проектировочных расчетах. Рассматривается задача определения основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины со свободными краями, у которой все четыре угла шарнирно закреплены. Пластина имеет симметричную структуру пакета, состоящего из одинаковых несущих слоев и ортотропного заполнителя. В такой постановке задача не имеет до настоящего времени аналитического решения. Это связано с необходимостью точного удовлетворения статических граничных условий на свободных краях пластины, что крайне затруднительно. Дается аналитическое решение поставленной задачи с использованием модели трехслойной пластины на основе теории слоистых композитов типа Рейсснера. Свободные колебания трехслойной пластины описываются вариационным уравнением, полученным на основе принципа Гамильтона. Для решения вариационного уравнения использован обобщенный метод Галеркина. Метод позволяет использовать аппроксимирующие функции, не обязательно точно удовлетворяющие статическим граничным условиям на свободных краях пластины, так как эти граничные условия удовлетворяются интегрально. В работе в качестве аппроксимирующих выбраны тригонометрические функции. Эти функции позволяют с высокой точностью представить изменения прогиба и угла поворота вдоль соответствующей координаты трехслойной пластины с рассматриваемым закреплением. В результате реализации обобщенного метода Галеркина задача сведена к однородной системе линейных алгебраических уравнений, из условия существования нетривиального решения которой получена аналитическая формула для основной частоты колебаний. По формуле вычислены частоты для нескольких вариантов пластин с различными сочетаниями размеров в плане и толщин слоев. Верификация полученных результатов аналогичным расчетом в конечно-элементном пакете показала высокую точность полученной формулы и возможность ее использования в проектировочных расчетах при минимальных вычислительных затратах.

Ключевые слова: трехслойная пластина, основная частота колебаний, обобщенный метод Галеркина.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 41–45

FUNDAMENTAL FREQUENCY DETERMINATION FOR SANDWICH PLATE SIMPLY SUPPORTED IN FOUR CORNERS

P. O. Deev*, A. V. Lopatin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
*E-mail: prokhor777@gmail.com

Sandwich plates with free edges are widely used in modern aerospace constructions making power base of non-hermetical spaceship bodies. Fundamental frequency of sandwich plate is very useful for weight efficiency assessment of construction that is significant in engineering calculations. The article deals with the problem of fundamental frequency calculation for rectangular sandwich plate with free edges and all corners simply-supported. The plate has symmetrical sandwich package structure consisting of two identical face-sheets and orthotropic core. In this formulation the problem has no analytical solution yet. This is due to the necessity of exact satisfaction of static boundary conditions on free edges of the plate; which is very hard to do. In the article the authors provide an analytical solution of the problem, where the sandwich plate model is based on Reissner-type layered composites theory. Variational equation of plate free vibrations derived from Hamilton principle. Solution procedure uses generalized Galerkin method to solve the variational equation. This method allows applying approximating functions that do not necessarily exactly satisfy static boundary conditions on free edges of the plate, as these conditions are satisfied integrally along each edge. In this paper trigonometric functions are applied as approximating functions. For the case

of plate with four corners simply-supported, trigonometric functions give good accuracy in approximation of plate deflection and rotation along the corresponding coordinate axis. The result of generalized Galerkin method implementation is a system of homogeneous linear algebraic equations and then, an analytical formula for fundamental frequency derives from the condition for the nontrivial solution existence of the system. Fundamental frequencies are calculated using this analytical formula for several variants of plates with different combinations of plate dimensions. Verification by fundamental frequency calculations for the same plates in finite-element package shows very good correlation with obtained analytical formula results. Thereby, resulting analytical formula for fundamental frequency could be successfully used in engineering and design calculations with minimal computational cost and enough accuracy.

Keywords: sandwich plate, fundamental frequency, generalized Galerkin method.

Введение. В современных космических аппаратах с корпусами негерметичного исполнения широко используются трехслойные пластины. При проектировочных расчетах трехслойных пластин первая частота колебаний служит удобным критерием весовой эффективности конструкции, так как ее величина зависит от отношения изгибной жесткости и погонной массы. Сегодня для определения частот и форм колебаний трехслойных пластин в основном используются пакеты конечно-элементного моделирования, такие как ANSYS, NASTRAN, COSMOS/M. Они позволяют проводить самый широкий анализ трехслойных конструкций. Недостатками использования пакетов являются значительные вычислительные ресурсы, в некоторых случаях – необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов и разработка специальных типов конечных элементов. Поэтому попрежнему актуально определение первой частоты колебаний трехслойной пластины аналитическими методами. Этому посвящены современные исследования отечественных и зарубежных авторов [1–12]. Однако ряд задач определения первой частоты трехслойных пластин со свободными краями не имеет аналитического решения до сих пор.

Цель работы – аналитическое решение задачи определения первой частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины со свободными краями, у которой все четыре угла шарнирно закреплены, и получение для первой частоты удобной для практических расчетов формулы.

Постановка задачи. Рассмотрим прямоугольную трехслойную пластину, у которой во всех четырех углах реализуется закрепление типа неподвижного шарнира. В одном из углов пластины расположим начало декартовой системы координат *OXY*. Размеры пластины по осям *OX* и *OY* обозначим *a* и *b* соответственно.

Вариационное уравнение изгибных колебаний пластины, согласно [13; 14], запишется следующим образом

$$\int_0^a\int_0^b\left[\left(D_{11}\frac{\partial\theta_x}{\partial x}+D_{12}\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial x}\right)+\right.$$
$$+\left(D_{12}\frac{\partial\theta_x}{\partial x}+D_{22}\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_y}{\partial y}\right)+$$
$$+D_{33}\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y}+\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y}\right)+$$
$$+D_{33}\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y}+\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)\delta\left(\frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right)+K_x\left(\theta_x+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta\theta_x+ \quad (1)$$
$$+K_x\left(\theta_x+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)+K_y\left(\theta_y+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\delta\theta_y+$$
$$\left.+K_y\left(\theta_y+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\delta\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)-\omega^2B_\rho w\delta w\right]dxdy=0,$$

где $w = w(x,y)$ – прогиб пластины; $\theta_x = \theta_x(x,y)$, $\theta_y = \theta y(x,y)$ – углы поворота нормали; D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, D_{33} – изгибные жесткости трехслойной пластины ($D_{12} = D_{21}$); K_x, K_y – сдвиговые жесткости трехслойной пластины; B_ρ – инерциальный параметр; ω – круговая частота колебаний; δ – знак вариации. Функции w, θ_x и θ_y определяют форму трехслойной пластины при изгибных колебаниях.

Варьируя функционал в уравнении (1), будем иметь

$$\int_0^a\int_0^b L\delta w dxdy-\int_0^b\left[Q_x\delta w\right]_0^a dy-\int_0^a\left[Q_y\delta w\right]_0^b dx=0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_x\delta\theta_x dxdy-\int_0^b\left[M_x\delta\theta_x\right]_0^a dy-\int_0^a\left[M_{xy}\delta\theta_x\right]_0^b dx=0, \quad (2)$$
$$\int_0^a\int_0^b L_y\delta\theta_y dxdy-\int_0^b\left[M_{xy}\delta\theta_y\right]_0^a dy-\int_0^a\left[M_y\delta\theta_y\right]_0^b dx=0,$$

где

$$L=K_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+K_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+K_x\frac{\partial\theta_x}{\partial x}+K_y\frac{\partial\theta_y}{\partial y}+B_\rho\omega^2 w,$$
$$L_x=-K_x\frac{\partial w}{\partial x}+D_{11}\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x^2}+D_{33}\frac{\partial^2\theta_x}{\partial y^2}-$$
$$-K_x\theta_x+\left(D_{12}+D_{33}\right)\frac{\partial^2\theta_y}{\partial x\partial y}, \quad (3)$$
$$L_y=-K_y\frac{\partial w}{\partial y}+\left(D_{12}+D_{33}\right)\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x\partial y}+$$
$$+D_{33}\frac{\partial^2\theta_y}{\partial x^2}+D_{22}\frac{\partial^2\theta_y}{\partial y^2}-K_y\theta_y$$

и

$$Q_x=K_x\left(\theta_x+\frac{\partial w}{\partial x}\right),$$
$$Q_y=K_y\left(\theta_y+\frac{\partial w}{\partial y}\right),$$

$$M_{xy} = D_{33}\left(\frac{\partial\theta_x}{\partial y} + \frac{\partial\theta_y}{\partial x}\right), \quad (4)$$

$$M_x = D_{11}\frac{\partial\theta_x}{\partial x} + D_{12}\frac{\partial\theta_y}{\partial y},$$

$$M_y = D_{12}\frac{\partial\theta_x}{\partial x} + D_{22}\frac{\partial\theta_y}{\partial y}.$$

Уравнения (2) являются основными вариационными уравнениями, которым должны удовлетворять собственные функции $w(x,y)$, $\theta x(x,y)$ и $\theta y(x,y)$, определяющие форму действительных изгибных колебаний трехслойной пластины.

Методика решения. Определение основной частоты колебаний трехслойной пластины может быть выполнено с помощью эффективных приближенных методов, одним из которых является обобщенный метод Галеркина. В рамках этого метода прогиб $w(x,y)$ и углы поворота $\theta_x(x,y)$, $\theta_y(x,y)$ заменяются аналитическими выражениями, аппроксимирующими первую форму колебаний пластины вдоль осей OX и OY. Представим прогиб и углы поворота в следующем виде [15]:

$$w = AU_x + BU_y + CU_xU_y,$$
$$\theta_x = DV_x + PV_xU_y, \quad (5)$$
$$\theta_y = FV_y + TU_xV_y,$$

где A, B, C, D, F, P, T – неизвестные числа; U_x, V_x, U_y, V_y – аппроксимирующие функции, имеющие вид

$$U_x(x) = \sin\lambda_1 x,$$
$$V_x(x) = \cos\lambda_1 x,$$
$$U_y(y) = \sin\lambda_2 y, \quad (6)$$
$$V_y(y) = \cos\lambda_2 y,$$

где $\lambda_1 = \pi/a$, $\lambda_2 = \pi/b$.

Вариации функций прогиба и углов поворота будут иметь вид

$$\delta w = U_x\delta A + U_y\delta B + U_xU_y\delta C,$$
$$\delta\theta_x = V_x\delta D + V_xU_y\delta P, \quad (7)$$
$$\delta\theta_y = V_y\delta F + U_xV_y\delta T.$$

Подставив (5)–(7) в (2), после группировки получим

$$\int_0^a\int_0^b LU_x\delta A dxdy - \int_0^b [Q_xU_x\delta A]_0^a dy - \int_0^a \left[Q_yU_x\delta A\right]_0^b dx +$$
$$+\int_0^a\int_0^b LU_y\delta B dxdy - \int_0^b \left[Q_xU_y\delta B\right]_0^a dy -$$
$$-\int_0^a \left[Q_yU_y\delta B\right]_0^b dx + \int_0^a\int_0^b LU_xU_y\delta C dxdy -$$
$$-\int_0^b \left[Q_xU_xU_y\delta C\right]_0^a dy - \int_0^a \left[Q_yU_xU_y\delta C\right]_0^b dx = 0,$$

$$\int_0^a\int_0^b L_xV_x\delta D dxdy - \int_0^b [M_xV_x\delta D]_0^a dy - \int_0^a \left[M_{xy}V_x\delta D\right]_0^b dx + \quad (8)$$
$$+\int_0^a\int_0^b L_xV_xU_y\delta P dxdy - \int_0^b \left[M_xV_xU_y\delta P\right]_0^a dy -$$
$$-\int_0^a \left[M_{xy}V_xU_y\delta P\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_yV_y\delta F dxdy - \int_0^b \left[M_{xy}V_y\delta F\right]_0^a dy - \int_0^a \left[M_yV_y\delta F\right]_0^b dx +$$
$$+\int_0^a\int_0^b L_yU_xV_y\delta T dxdy - \int_0^b \left[M_{xy}U_xV_y\delta T\right]_0^a dy -$$
$$-\int_0^a \left[M_yU_xV_y\delta T\right]_0^b dx = 0.$$

Учитывая произвольность вариаций δA, δB, δC, δD, δF, δP, δT, получим систему из семи разрешающих уравнений обобщенного метода Галеркина с естественными граничными условиями:

$$\int_0^a\int_0^b LU_x dxdy - \int_0^b [Q_xU_x]_0^a dy - \int_0^a \left[Q_yU_x\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b LU_y dxdy - \int_0^b \left[Q_xU_y\right]_0^a dy - \int_0^a \left[Q_yU_y\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_xV_x dxdy - \int_0^b [M_xV_x]_0^a dy - \int_0^a \left[M_{xy}V_x\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_yV_y dxdy - \int_0^b \left[M_{xy}V_y\right]_0^a dy - \int_0^a \left[M_yV_y\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b LU_xU_y dxdy - \int_0^b \left[Q_xU_xU_y\right]_0^a dy -$$
$$-\int_0^a \left[Q_yU_xU_y\right]_0^b dx = 0, \quad (9)$$
$$\int_0^a\int_0^b L_xV_xU_y dxdy - \int_0^b \left[M_xV_xU_y\right]_0^a dy - \int_0^a \left[M_{xy}V_xU_y\right]_0^b dx = 0,$$
$$\int_0^a\int_0^b L_yU_xV_y dxdy - \int_0^b \left[M_{xy}U_xV_y\right]_0^a dy - \int_0^a \left[M_yU_xV_y\right]_0^b dx = 0.$$

Выполнив в (3) и (4) дифференцирование, интегрирование и раскрытие скобок в уравнениях (9), получим однородную систему линейных алгебраических уравнений с неизвестными A, B, C, D, F, P, T. Удовлетворяя условие существования нетривиального решения системы, приравняем нулю определитель основной ее матрицы и, обозначив $\Omega = \omega^2$, получим следующее кубическое уравнение:

$$z_3\Omega^3 + z_2\Omega^2 + z_1\Omega + z_0 = 0. \quad (10)$$

Определив наименьший вещественный корень уравнения (10), учитывая соотношение $\omega = 2\pi f$, где f – частота в герцах, получим окончательную формулу для первой частоты колебаний:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\sqrt[3]{12z_3\left(3z_1z_2 - 9z_0z_3 + \sqrt{12z_1^3z_3 - 3z_1^2z_2^2 - 54z_3z_2z_1z_0 + 81z_0^2z_3^2 + 12z_0z_2^3}\right) - 8z_2^3}}{6z_3(12z_1z_3 + 4z_2^2 - 2z_2)} - \frac{1}{6z_3}}. \quad (11)$$

Важно отметить, что в (10) и (11) коэффициенты z_1, z_2, z_3 и z_0 определяются только геометрией пластины и параметрами ее материала.

Результаты расчетов и область их применения. В качестве примера определим основную частоту колебаний для нескольких прямоугольных трехслойных пластин, шарнирно закрепленных в углах и отличающихся размерами в плане, толщинами несущих слоев и заполнителя. Параметры материала несущих слоев: E_x = 54,55 ГПа, E_y = 54,55 ГПа, G_{xy} = 20,67 ГПа, G_{xz} = = G_{yz} = 3,78 ГПа, $\nu_{xy} = \nu_{yx}$ = 0,32, ρ = 1 500 кг/м^3. Материал заполнителя характеризуется модулями сдвига G_{xz} = 440 МПа, G_{yz} = 220 МПа и плотностью ρ = = 83 кг/м^3. Размеры пластины в плане: b = 1 м; a = 0,5, 1, 2 м. Суммарная толщина несущих слоев t равна 0,001 и 0,002 м, а толщина заполнителя h будет 0,01, 0,05, 0,1 м.

Частоты колебаний трехслойных пластин, вычисленные по формуле (11) для приведенных размеров, приведены в табл. 1.

Для проверки полученных результатов определим основную частоту колебаний трехслойной пластины, шарнирно закрепленной в четырех углах, методом конечных элементов (МКЭ). Расчет выполним в пакете ANSYS, используя трехслойный вариант конечного элемента SHELL181. Значения частот в герцах, вычисленных МКЭ, – в табл. 2.

Сравнивая соответствующие частоты из табл. 1 и 2, можно видеть, что разница не превышает 5 %. Это позволяет достоверно рассчитывать по полученной формуле первую частоту прямоугольной трехслойной пластины при проектировании конструкций, в составе которых такая пластина применяется.

Таблица 1

Частоты колебаний трехслойной пластины, рассчитанные по полученной формуле

t, м	a = 0,5 м, b = 1 м			a = 1 м, b = 1 м		
	h = = 0,01 м	h = = 0,05 м	h = = 0,1 м	h = = 0,01 м	h = = 0,05 м	h = = 0,1 м
0,001	39,904	120,45	177,69	30,591	93,175	137,72
0,002	45,867	149,48	225,48	35,444	115,85	175,07

Таблица 2

Частоты колебаний трехслойной пластины, рассчитанные в ANSYS

t, м	a = 0,5 м, b = 1 м			a = 1 м, b = 1 м		
	h = = 0,01 м	h = = 0,05 м	h = = 0,1 м	h = = 0,01 м	h = = 0,05 м	h = = 0,1 м
0,001	38,902	117,13	173,52	29,686	90,609	134,49
0,002	43,783	145,19	216,77	33,835	112,53	168,25

Заключение. В статье с помощью обобщенного метода Галеркина решена задача определения основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины, которая шарнирно закреплена в четырех углах. Получена достаточно простая аналитическая формула для первой частоты колебаний пластины.

Верификация результатов позволяет сделать вывод о том, что по полученной формуле с достаточной точностью и минимальными вычислительными затратами можно определять основные частоты колебаний пластин, шарнирно закрепленных в четырех углах.

Библиографические ссылки

1. Коган Е. А., Юрченко А. А. Нелинейные колебания защемленных по контуру трехслойных пластин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 5. С. 25–34.

2. Frostig Y., Schwarts-Givli H., Rabinovitch O. Free Vibrations of Delaminated Unidirectional Sandwich Panels with a Transversely Flexible Core – A Modified Galerkin Approach // J. of Sound and Vibration. 2007. Vol. 301, no. 2. P. 253–277.

3. Паймушин В. Н., Полякова Т. В. Точные решения задач об изгибных формах потери устойчивости и свободных колебаний прямоугольной ортотропной пластины с незакрепленными краями // Ученые записки Казанского университета. Сер. «Физико-математические науки». 2010. Т. 152, № 1. С. 181–198.

4. Natural Vibrations of Laminated and Sandwich Plates / M. K. Rao [et al.] // J. of Engineering Mech. 2004. Vol. 130, no 11. P. 1268–1278.

5. A Semi-Analytical Method for Bending, Buckling, and Free Vibration Analyses / J. Liu [et al.] // Int. J. of Struct. Stability and Dynamics. 2010. Vol. 10, no 1. P. 127–151.

6. Lee C. R., Kam T. Y., Sun S. J. Free-Vibration Analysis and Material Constants Identification of Laminated Composite Sandwich Plates // J. of Engineering Mech. 2007. Vol. 133, no. 8. P. 12–23.

7. Леоненко Д. В. Колебания круговых трехслойных пластин, связанных с упругим основанием, под действием синусоидальных нагрузок // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2009. № 3. С. 89–93.

8. Sekine H., Shirahata H., Matsuda M. Vibration Analysis of Composite Sandwich Plates and Layup Optimization // Sandwich Structures: Advancing with Sandwich Structures and Materials. 2005. Vol. 7. P. 557–566.

9. Brischetto S., Carrera E., Demasi L. Free vibration of sandwich plates and shells by using Zig-Zag function // Shock and Vibration. 2009. Vol. 16. P. 495–503.

10. Lok T. S., Cheng Q. H. Free Vibration of Clamped Orthotropic Sandwich Panel // J. of Sound and Vibration. 2000. Vol. 229, no. 2. P. 311–327.

11. Frostig Y., Shwartz-Givli H., Rabinovich O. Free Vibration of Delaminated Unidirectional Sandwich Panels with a Transversely Flexible Core and General Boundary Conditions – A High-Order Approach // J. of Sandwich Struct. and Materials. 2008. Vol. 10. P. 99–131.

12. Лопатин А. В., Деев П. О. Определение основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины со свободным краем // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 2(36). С. 53–61.

13. Vasiliev V. V. Mechanics of composite structures. Published by Taylor & Francis, 1993.

14. Лопатин А. В., Деев П. О. Определение основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины с двумя свободными краями // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 1(34). С. 46–50.

15. Деев П. О. Определение основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины, жестко закрепленной в центральной точке // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4(33). С. 53–61.

References

1. Kogan E. A., Yurchenko A. A. [Non-linear vibration of sandwich plates clamped along the contour]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, p. 25–34 (In Russ.).

2. Frostig Y., Schwarts-Givli H., Rabinovitch O. Free Vibrations of Delaminated Unidirectional Sandwich Panels with a Transversely Flexible Core – A Modified Galerkin Approach. *J. of Sound and Vibration*, 2007, vol. 301, no. 2, p. 253–277.

3. Paimushin V. N., Polyakova T. V. [Exact solutions of flexural buckling and free vibration problems for rectangular orthotropic plate with free edges]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*, 2010, vol. 152, no 1, p. 181–198 (In Russ.).

4. Rao M. K. et al. Natural Vibrations of Laminated and Sandwich Plates. *J. of Engineering Mech.*, 2004, vol. 130, no. 11, p. 1268–1278.

5. Liu J. et al. A Semi-Analytical Method for Bending, Buckling, and Free Vibration Analyses. *Int. J. of Struct. Stability and Dynamics*, 2010, vol. 10, no. 1, p. 127–151.

6. Lee C. R., Kam T. Y., Sun S. J., Free-Vibration Analysis and Material Constants Identification of Laminated Composite Sandwich Plates. *J. of Engineering Mech.*, 2007, vol. 133, no. 8, p. 12–23.

7. Leonenko D. V. [Vibration of circular sandwich plates, connected with elastic base, under sinusoidal loads]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2009, no. 3, p. 89–93 (In Russ.).

8. Sekine H., Shirahata H., Matsuda M. Vibration Analysis of Composite Sandwich Plates and Layup Optimization. *Sandwich Structures: Advancing with Sandwich Structures and Materials*. 2005, vol. 7, p. 557–566.

9. Brischetto S., Carrera E., Demasi L. Free vibration of sandwich plates and shells by using Zig-Zag function. *Shock and Vibration*, 2009, vol. 16, p. 495–503.

10. Lok T. S., Cheng Q. H. Free Vibration of Clamped Orthotropic Sandwich Panel. *J. of Sound and Vibration*, 2000, vol. 229, no. 2, p. 311–327.

11. Frostig Y., Shwartz-Givli H., Rabinovich O. Free Vibration of Delaminated Unidirectional Sandwich Panels with a Transversely Flexible Core and General Boundary Conditions – A High-Order Approach. *J. of Sandwich Struct. and Materials*, 2008, vol. 10, p. 99–131.

12. Lopatin A. V., Deev P. O. [Fundamental frequency determination for rectangular sandwich plate with free edge]. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 2(36), p. 53–61 (In Russ.).

13. Vasiliev V. V. Mechanics of composite structures. Taylor & Francis, 1993.

14. Lopatin A. V., Deev P. O. [Fundamental frequency determination for rectangular sandwich plate with two free edges]. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 1(34), p. 46–50 (In Russ.).

15. Deev P. O. [Fundamental frequency determination for rectangular sandwich plate clamped in the central point]. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 4(33), p. 54–62 (In Russ.).

© Деев П. О., Лопатин А. В., 2015

УДК 621.396.67:629.78

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 46–51

МЕТОДИКА ПРЕЦИЗИОННОЙ НАСТРОЙКИ АНТЕНН КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И. С. Додорин[1*], Н. А. Смирнов[2]

[1]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: ivans@iss-reshetnev.ru

Рассмотрена проблематика настройки антенн космического аппарата. Проводится анализ существующей методики позиционирования рефлектора и облучателя в пространстве для получения наилучших радиотехнических характеристик антенн. Блок-схемой показан процесс прецизионной настройки антенн космического аппарата. Для позиционирования рефлектора в пространстве применяется механизм с параллельной кинематикой. Кратко приводятся особенности этого механизма. Проводится анализ существующей методики и механизма с параллельной кинематикой. Предлагается новая методика прецизионной настройки антенн космического аппарата с использованием системы автоматизированного проектирования. Приведён анализ документации и программного обеспечения механизма с параллельной кинематикой, который показал, что один из вариантов перемещения этого механизма в пространстве – это использование матриц поворота. Для получения этих матриц в системе автоматизированного проектирования разработана кинематическая модель механизма с параллельной кинематикой, а так как этот механизм работает в совокупности со всем технологическим стендом, то и модель стенда также спроектирована в той же системе. Далее с применением системы автоматизированного проектирования осуществляются простейшие перемещения спроектированных кинематических моделей в пространстве, результатами которых являются матрицы поворота. Также при использовании кинематической модели стенда в системе автоматизированного проектирования наблюдается изменение положения механизма с параллельной кинематикой и рефлектора до переноса данных на реальный технологический стенд. Полученные данные перемещений проверены аналитически. Результаты анализа показали, что матрицы поворота, полученные в системе автоматизированного проектирования, полностью совпадают с матрицами поворота, полученными аналитическим способом и их можно использовать для управления механизмом с параллельной кинематикой на реальном технологическом стенде. Методика прецизионной настройки антенн космического аппарата, представленная в этой статье, позволяет не только осуществить перемещение рефлектора антенны, но также позволяет оценить изменение его положения в пространстве до перемещения на реальном стенде, что, в свою очередь, сводит к минимуму возможность ошибок на технологическом этапе настройки антенны космического аппарата.

Ключевые слова: антенна космического аппарата, рефлектор, прецизионная настройка, матрица поворота, механизм с параллельной кинематикой, система автоматизированного проектирования.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 46–51

METHODOLOGY OF PRECISION ADJUSTMENT OF SATELLITE ANTENNAS

I. S. Dodorin[1*], N. A. Smirnov[2]

[1]JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
[2]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
[*]E-mail: ivans@iss-reshetnev.ru

The article deals with the problems of adjustment of satellite antennas. The analysis of existing methods of positioning reflector and feed in the space to get the best performance of radio antennas is given. A block diagram illustrates the process of adjustment precision satellite antennas. For positioning reflector in the space the mechanism with parallel kinematics is used. The features of this mechanism are briefly outlined. The analysis of the existing methodology and mechanism with parallel kinematics is given. A new method of precision adjustment satellite antennas using CAD system is shown. The analysis of documentation and software mechanism with parallel kinematics, which showed that one of the ways to move this mechanism is the use of the space rotation matrices, is carried out. For these

matrices in CAD system kinematic model of the mechanism with parallel kinematics is developed, and this mechanism works in conjunction with all the technological stand, then stand as a model designed in the same system. Further, with the use of CAD system simple move designed kinematic models in space, which results in a rotation matrix are conducted. Also, when using a kinematic model of the stand in the CAD system the change in position of the mechanism with parallel kinematics and reflector, to transfer data to a real technological stand is observed. The obtained displacement data are verified analytically. The results showed that the rotation matrix obtained in CAD system, fully coincide with the rotation matrix obtained by analytical method and can be used to control the mechanism with parallel kinematics in the real technological stand. Precision adjustment technique satellite antennas presented in this paper can not only carry out the movement of reflector antenna, but also allows us to estimate the change in its position in space to move on a real stand, which in turn minimizes the possibility of errors on the technological stage antenna tuning space apparatus.

Keywords: satellite antenna, reflector, precision adjustment, rotation matrix, the mechanism with parallel kinematics.

Введение. Одной из важнейших характеристик космического аппарата (КА) являются радиотехнические характеристики (РТХ) его антенн. От этих характеристик напрямую зависит качество передаваемого сигнала спутником. Для получения наилучших параметров необходимо выбрать оптимальное взаимное положение антенны и облучателя. Для поиска наилучшего положения разработан технологический стенд для прецизионной настройки антенн КА (рис. 1), на котором отрабатываются варианты позиционирования и проводятся измерения РТХ. Найденное оптимальное положение элементов стенда затем воспроизводится на реальном космическом аппарате. Взаимное позиционирование рефлектора и излучателя на стенде реализуется с использованием механизма с параллельной кинематикой с шестью степенями свободы (гексапод) [1–4]. В их замкнутой кинематической цепи обеспечивается высокая жёсткость всей конструкции, соответственно повышается точность позиционирования. Также при заданной номинальной грузоподъёмности звенья гексапода намного легче, чем звенья механизма с открытой кинематической цепью [5–7].

На данный момент времени оптимальное положение рефлектора и облучателя в пространстве находится при помощи итерационных перемещений гексапода в пространстве с промежуточными измерениями РТХ антенны. Перемещения производят до тех пор, пока координаты контрольных точек, расположенных на рефлекторе, не совпадут с их же координатами, указанными в КД. Для достижения этого положения необходимо совершить 5–10 шагов с последующим измерением РТХ. На выполнение всех шагов требуется до 3–5 часов (рис. 2). Длительность измерений РТХ составляет сутки. Основная же проблема заключается в том, что неизвестно, насколько необходимо изменить положение гексапода для того, чтобы контрольные точки, расположенные на рефлекторе, переместились в необходимое положение.

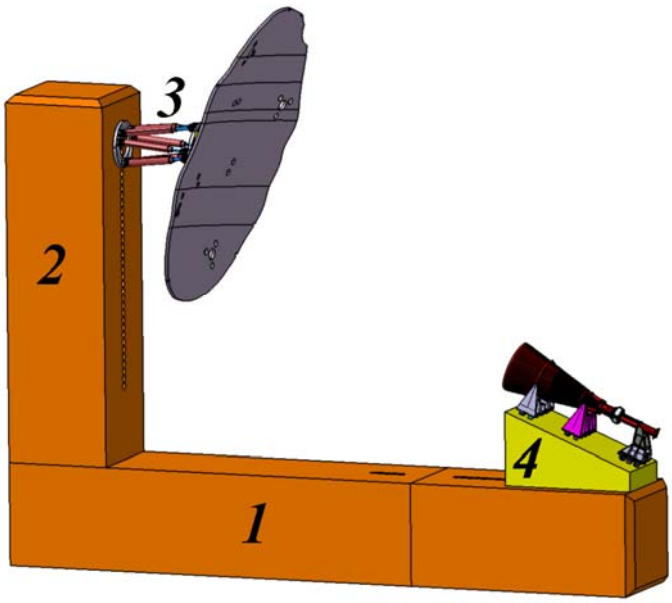


Рис. 1. Макет стенда: *1* – основание; *2* – стойка;
3 – гексапод для рефлектора; *4* – крепёж для облучателя

Поиск решения. Для решения этой задачи потребовалось разработать методику для прецизионной настройки антенн космического аппарата с использованием стенда на основе механизмов параллельной структуры, в условиях применения интегрированных систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих снизить трудоёмкость и сократить длительность технологической операции производства и способствующих повышению качества проектных решений.

Первоначально был проведён анализ существующего программного обеспечения по управлению гексаподом. Результатом стало обнаружение возможности перемещения гексапода в пространстве из одной точки в другую при помощи матрицы поворота и смещения координат [8–11].

Анализ пользовательской документации гексапода позволил построить его модель со всеми кинематическими связями и ограничениями в составе модели технологического стенда для прецизионной настройки антенн КА (см. рис. 1) [12]. Используя эту модель, есть возможность визуального контроля до осуществления перемещения рефлектора в пространстве и, что очень важно, нахождения наилучшего приближения исходных координат контрольных точек к их же координатам в КД.

Рассмотрим пример перемещения рефлектора в пространстве. Вместо группы контрольных точек и их координат по КД для наглядности выберем первую начальную точку, лежащую на поверхности рефлектора, и вторую конечную точку, расположенную таким образом, чтобы вращение осуществилось только вокруг оси *X* (рис. 3). Затем перемещаем рефлектор и всю конструкцию, выполнив операцию совпадения этих точек. Так как рефлектор связан определёнными ограничениями с платформой гексапода, на которой лежит исходная система координат, то переместившись, он сдвигает эту платформу и тем самым образует новую систему координат, переход в которую и необходимо совершить гексаподу (рис. 4).

Обсуждение результатов. Используя инструменты САПР, выполняем измерение положения результирующей системы координат к исходной, получаем матрицу поворота и смещения её в пространстве (рис. 5) и проверяем аналитическими вычислениями.

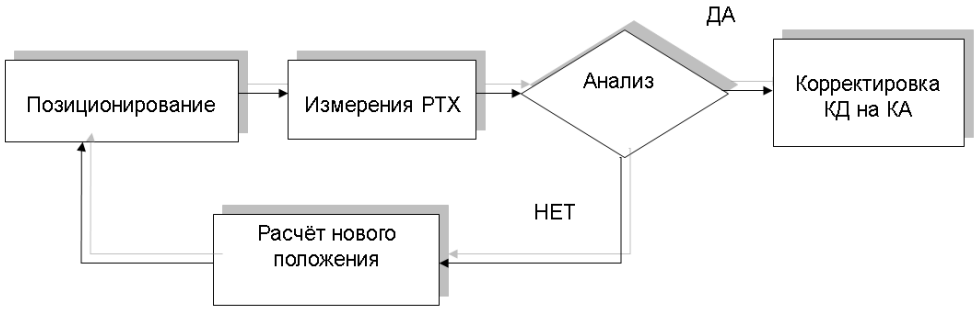


Рис. 2. Блок-схема процесса прецизионной настройки антенн космического аппарата

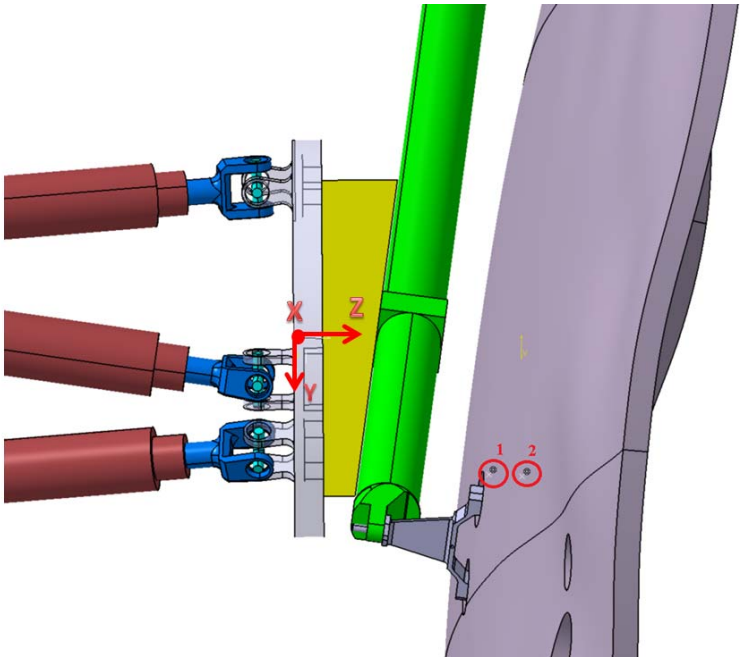


Рис. 3. Исходное положение системы координат гексапода:
1 – начальная точка, *2* – конечная точка

Любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как совокупность поворотов вокруг трех ортогональных осей [13]. Этой композиции соответствует матрица, равная произведению соответствующих трех матриц поворота. Далее рассмотрим как поворот вокруг каждой из осей, так поворот вокруг нескольких осей системы координат [14].

Полученная матрица соответствует матрице поворота вокруг оси X (1).

При $\alpha = 9,8677^{\circ}$

$$M_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9852 & -0,1713 \\ 0 & 0,1713 & 0,9852 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Ниже приведены результаты поворотов вокруг оси Y (рис. 6) и Z (рис. 7), а также соответствующие им матрицы поворота (2) и (3).

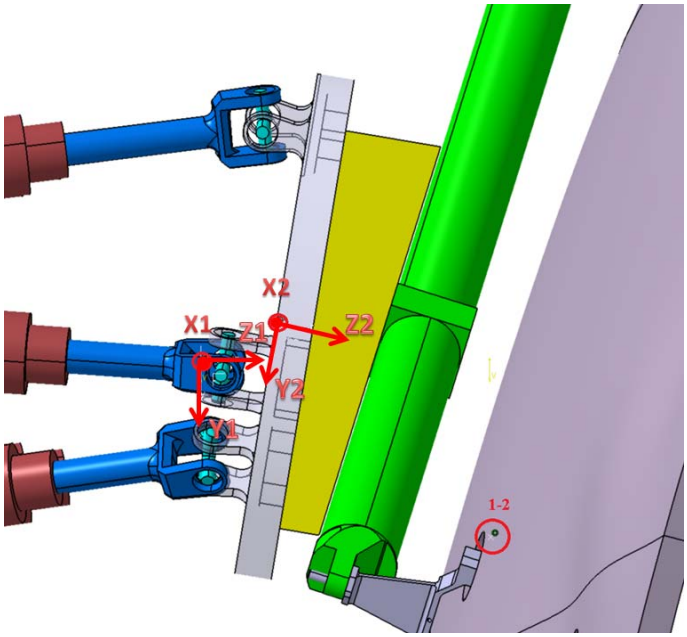


Рис. 4. Конечное положение системы координат гексапода:
1–2 – конечная точка

OxA	29,83mm	OyA	-23,085mm	OzA	47,236mm
UxA	1	UyA	0	UzA	0
VxA	0	VyA	0,985206	VzA	-0,171375
WxA	0	WyA	0,171375	WzA	0,985206

Рис. 5. Матрица поворота вокруг оси X от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

OxA	2,837mm	OyA	0mm	OzA	1,579mm
UxA	0,992362	UyA	0	UzA	0,123359
VxA	0	VyA	1	VzA	0
WxA	-0,123359	WyA	0	WzA	0,992362

Рис. 6. Матрица поворота вокруг оси Y от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

OxA	-3,258e-009mm	OyA	0mm	OzA	1,596mm
UxA	0,938522	UyA	-0,345219	UzA	0
VxA	0,345219	VyA	0,938522	VzA	0
WxA	0	WyA	0	WzA	1

Рис. 7. Матрица поворота вокруг оси Z от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

OxA	29,83mm	OyA	-23,085mm	OzA	47,236mm
UxA	0,952155	UyA	0,305616	UzA	0
VxA	-0,301095	VyA	0,938068	VzA	-0,171375
WxA	-0,052375	WyA	0,163175	WzA	0,985206

Рис. 8. Матрица поворота вокруг оси X и Z от результирующей системы координат к исходной и смещения по осям

При $\alpha = 7,0806^\circ$

$$M_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9923 & 0 & 0,1233 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,1233 & 0 & 0,9923 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При $\alpha = 20,1988^\circ$

$$M_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9385 & -0,3452 & 0 \\ 0,3452 & 0,9385 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Если же поворот осуществляется вокруг нескольких осей, то матрица поворота будет иметь вид, представленный на рис. 8.

При $\alpha = 9,8677^\circ$, $\beta = -17,795^\circ$

$$M_{xz}(\alpha,\beta) = M_x(\alpha) \times M_z(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ -\cos\alpha\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha \\ \sin\alpha\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,9521 & 0,3056 & 0 \\ -0,3010 & 0,9380 & -0,1713 \\ -0,0523 & 0,1631 & 0,9852 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Значения из полученных матриц переносим в программное обеспечение гексапода [15]. Гексапод, в свою очередь, совершает перемещение в результирующую систему координат.

Заключение. Близкое совпадение результатов аналитических расчетов и измерений, проведенных на стенде, показывают правильность технических решений, использованных при создании механической части стенда, корректность вычислительного алгоритма и программного обеспечения стенда, выбранных методик измерения и обработки результатов. Благодаря данной методике и использованию САПР появилась возможность при помощи гексапода добиться совпадения контрольных точек на рефлекторе с точками, указанными в КД, и существенно снизить количество и трудоёмкость выполняемых операций прецизионной настройки антенн КА.

Библиографические ссылки

1. Fong Terrence W. Design and Testing of a Stewart Platform Augmented Manipulator for Space Applications / Massachusetts Institute of Technology. 1990, 260 p.
2. Huang Z., Li Q. C. Some Novel Minor-Mobility Parallel Mechanisms / Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics : Proceedings of the 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Chemnitz, 2002. 905 p.
3. Merlet J.-P. Parallel Robots. Second Edition. Springer, 2006. 401 p.
4. Sandin P. E. Robot mechanisms and mechanical devices illustrated. 2003. 300 p.
5. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms. Springer, 2006. 549 p.
6. Глазунов В. А. Разработка манипуляционных механизмов с параллельно-перекрестной структурой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 2. С. 90–100.
7. Nakamura M., Goto S., Kyura N. Mechatronic Servo System Control Problems in Industries. Springer, 2004. 196 p.
8. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. М. : Машиностроение, 2007. 256 с.
9. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М. : Наука, 1988. 640 с.
10. Глазунов В. А. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. № 1. С. 41–49.
11. Liu X-J., Wang J. Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design. Springer, 2014. 309 p.
12. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
13. Кузьмин Д. В. Моделирование динамики мехатронных систем. Уравнения и алгоритмы : монография. Архангельск : Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 120 с.
14. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами : учебник для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 400 с.
15. Осипов Д. Delphi. Профессиональное программирование. СПб. : Символ-Плюс, 2006. 1056 с.

References

1. Fong Terrence W. Design and Testing of a Stewart Platform Augmented Manipulator for Space Applications: Massachusetts Institute of Technology, 1990, 260 p.
2. Huang Z., Li Q. C. Some Novel Minor-Mobility Parallel Mechanisms. Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics: Proceedings of the 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Chemnitz, 2002, 905 p.
3. Merlet J.-P.Parallel Robots Second Edition, Springer 2006, 401 p.
4. Sandin P. E. Robot mechanisms and mechanical devices illustrated, 2003, 300 p.
5. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms, Springer, 2006, 549 p.
6. Glazunov V. A. [Develop manipulative mechanisms parallel-cross structure]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2008, no. 2, p. 90–100 (In Russ.).
7. Nakamura M., Goto S., Kyura N. Mechatronic Servo System Control Problems in Industries, Springer, 2004. 196 p.
8. Poduraev Yu. V. *Mekhatronika: osnovy, metody, primenenie.* [Mechatronics: fundamentals, methods and application.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 256 p.
9. Artobolevskiy I. I. *Teoriya mekhanizmov i mashin*. [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 640 p.
10. Glazunov V. A. [Principles of classification and methods of analysis of spatial mechanisms with parallel structure]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin.* 1990, no. 1, p. 41–49 (In Russ.).
11. Liu X-J., Wang J. Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design, Springer, 2014, 309 p.
12. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami.* [Management Basics robotic manipulator]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana Publ, 2004, 480 p.
13. Kuz'min D. V. *Modelirovanie dinamiki mekhatronnykh sistem. Uravneniya i algoritmy*. [Modeling the dynamics of mechatronic systems. Equations and algorithms]. Monograph. Arkhangelsk, Arkhang. gos. tekhn. un-t Publ., 2008, 120 p.
14. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Upravlenie robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami.* [Control of robots. Management Basics robotic manipulator]. Textbook for high schools. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2000, 400 p.
15. Osipov D. *Delphi. Professional'noe programmirovanie*. [Delphi. Professional programming] Saint Petersburg, Simvol-Plyus Publ., 2006, 1056 p.

© Додорин И. С., Смирнов Н. А., 2015

УДК 303.064

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 52–61

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РОСКОСМОСА ПРИ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ

Н. Н. Коблов[1, 2*], В. Д. Черватюк[1, 2]

[1]АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Институт неразрушающего контроля
Российская Федерация, 634034, г. Томск, просп. Ленина, 30
[*]E-mail: polus@online.tomsk.net

Отмечена важность инженерных данных – интеллектуальной собственности предприятия, от управления которыми зависит эффективная деятельность всех его служб. Рассмотрены принципы создания и обработки бумажной документации как общепринятой формы представления результатов проектирования. Обращено внимание на существенные неудобства при работе с бумажными подлинниками конструкторских документов и на потребность специалистов в оперативном доступе к инженерным данным разрабатываемых изделий.

Предложен способ перехода к электронным подлинникам. В этом случае выпуск, согласование, хранение конструкторской документации и внесение в нее изменений осуществляются в электронном виде. Данная технология подкреплена нормативной базой и основными положениями концепции информатизации Роскосмоса, направленной на выполнение крупномасштабных проектов по созданию высокотехнологичной наукоемкой продукции.

Представлена разработанная и внедренная в АО «НПЦ «Полюс» автоматизированная система управления инженерными данными и производством на всех этапах жизненного цикла изделия. Изложены стратегические принципы построения единого информационного пространства для управления инженерными данными, описаны механизмы эффективного взаимодействия нескольких предприятий Роскосмоса при работе с технической документацией в рамках совместных разработок.

Заинтересованным предприятиям предложено совместно продолжить начатый АО «НПЦ «Полюс» проект по разработке и внедрению автоматизированной системы управления инженерными данными и производством. Базовое решение АО «НПЦ «Полюс» поставляет с открытым кодом, а предприятия-участники своими силами при поддержке координационной службы расширяют функционал системы, тем самым развивая проект до уровня отраслевого решения.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, электронный документооборот, 1С:Предприятие 8, информационная база, универсальный механизм обмена данными, электронная рассылка.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 52–61

PROSPECTS OF COOPERATION BETWEEN THE ENTERPRISES OF ROSCOSMOS WHEN WORKING WITH ELECTRONIC TECHNICAL DOCUMENTATION

N. N. Koblov[1, 2*], V. D. Chervatyuk[1, 2]

[1]SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirova Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
[2]National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of Non-Destructive Testing,
Department of precision instrument making
30, Lenin Av., Tomsk, 634034, Russian Federation
[*]E-mail: polus@online.tomsk.net

The importance of engineering data – intellectual property of the company, from management which determines the effective activity of all its services is emphasized. The principles underlying the creation and processing of paper documentation as a common form of presentation of the results of the design are considered. The attention was drawn to a significant inconvenience when working with paper original design documents and the need for specialists in online access to engineering data developed products.

The method of transition to electronic originals is offered. In this case, the issuance, negotiation, store design documentation and amendments are made in electronic form. This technology is supported by the regulatory framework

and the main provisions of the concept of Informatization of the Russian Federal space Agency, aimed at implementing large-scale projects to create high-tech products.

Designed and implemented at SC "SIC "Polyus " automated control system engineering data and production at all stages of the product life cycle are presented. The strategic principles of the unified information space for engineering data management, describes the mechanisms of effective interaction of several companies 'Roscosmos' when working with technical documentation in the framework of the joint development are set out.

Interested companies are jointly proposed to continue SC "SIC "Polyus" project on the development and implementation of automated systems engineering data management and production. The basic decision of SC "SIC "Polyus" delivers open source and enterprise-participants on their own with the support coordination services extend the functionality of the system, thereby developing the project to the level of industry solutions.

Keywords: the automated control system, electronic document circulation, 1C:Enterprise 8, information base, the universal mechanism of data exchange, electronic dispatch.

Введение. В условиях современной рыночной экономики каждому промышленному предприятию для поддержания своей конкурентоспособности необходимо одновременно решать ряд сложных задач. Требуется постоянно увеличивать номенклатуру выпускаемых изделий, оптимизировать затраты на их разработку и производство, а также сокращать сроки выпуска готовой продукции. При этом необходимо обеспечить ее высокое качество и наладить продуктивный диалог с партнерами.

Залогом успеха в достижении поставленных целей является умение руководства, как всего предприятия, так и его подразделений, принимать быстрые, но в то же время взвешенные стратегические решения. Каждому сотруднику, задействованному на этапах проектирования и подготовки изделий к производству, необходимо постоянно держать под контролем все изменения инженерных данных, представленных в виде технической документации на выпускаемые изделия, различных стандартов и нормативов, всевозможных баз данных, файлов и связей между ними. Инженерные данные – сложно устроенная, информационно насыщенная и дорогая интеллектуальная собственность, особенно в применении к большому комплексному проекту, над которым работает множество разносторонних специалистов. Это своего рода активы предприятия, нерациональное использование которых приводит к снижению эффективности его работы, а в итоге – к уменьшению общей прибыли. В связи с этим наблюдается тенденция постоянного роста требований к скорости обработки подобных данных и, следовательно, к скорости всего документооборота на предприятии.

Бумажная документация. Большинство действующих российских производств унаследовало с прошлого века принципы создания и обработки документации, которые долгое время не подвергались значительным изменениям, т. е. практически все потоки информации как внутри самих предприятий, так и при взаимодействии с внешними партнерами реализуются с помощью бумажного документооборота. В течение многих десятков лет бумажная документация являлась общепринятой формой представления результатов интеллектуальной деятельности людей и инструментом их информационного взаимодействия. Ее созданием были заняты (и заняты по сей день) миллионы разработчиков, конструкторов, технологов, производственников, воспитанных на основе сотен стандартов, детально регламентирующих ведение дел [1–3]. И хотя данный подход подкреплен полноценной законодательно-нормативной базой, методическими разработками и рекомендациями, которые можно применять на практике, и не требует никаких специальных технических средств, все больше становятся заметны его слабые стороны. Во-первых, это низкая скорость создания, обработки и передачи документов. Это усугубляется постоянно увеличивающимся объемом работ, а главное, ростом количества типовых разработок на основе существующих изделий, поскольку процессы производства и поддержки изделия зачастую представляют собой одни и те же повторяющиеся рутинные действия. Во-вторых, по мере усложнения изделий происходит резкий рост объемов технической документации. При традиционных технологиях выполнения сложных проектов объемы выпускаемых бумажных документов настолько велики, что только поиск необходимой информации для выполнения требуемой процедуры становится проблемой, на решение которой может уходить время, сопоставимое со временем выполнения самой процедуры. С учетом этого стоимость бумажной документации и затраты на работу с ней составляют существенную часть стоимости как самого изделия, так и его эксплуатации [2].

Существуют также определенные сложности с организацией доступа к архиву: пользоваться документом в определенное время может только один человек. Поэтому в различных подразделениях обычно создаются собственные мини-архивы документации. При этом практически неизбежно возникает дублирование информации, одни и те же данные могут встречаться в различном изложении у нескольких инженеров одновременно, что, естественно, влечет за собой несоответствия в выпускаемой ими документации.

Более того, бумажная документация и способы представления информации на ней ограничивают возможности использования современных информационных технологий. Так, например, трехмерная модель изделия, создаваемая в современной САПР, вообще не может быть адекватно представлена на бумаге [4, 5].

Отмеченные выше проблемы особенно актуальны для предприятий приборостроительной тематики ракетно-космической промышленности, выполняющих крупномасштабные и наукоемкие проекты, характеризующиеся многономенклатурностью изделий

и длительным циклом разработки, производства и эксплуатации [1].

Поэтому актуальна организация совместной работы всех подразделений предприятия, когда необходимо обеспечить интеграцию, совместное использование и хранение информации, порождаемой на всех этапах жизненного цикла изделия [6]. Различные группы специалистов должны иметь возможность обмениваться информацией быстро и в достаточном объеме, а руководители проектов, ответственные за принятие важных решений, должны иметь быстрый доступ к данным об изделии [4].

Переход к безбумажным технологиям. Решение задачи перехода предприятий к действительно безбумажным технологиям проектирования, производства и эксплуатации продукции позволит многократно ускорить доставку документов нужным лицам, обеспечить параллелизм обсуждения, контроля и утверждения результатов работы, существенно сократить длительность процессов, а также обеспечивает ряд других преимуществ, среди которых:

– простота внесения изменений в документ;

– возможность помещать в документе не только текст, но и мультимедийные данные;

– использование заранее заготовленных форм;

– экономия бумаги;

– более высокая компактность архивов;

– защита документов от несанкционированного доступа и разграничение прав доступа сотрудников к информации;

– точная идентификация лица, подписавшего электронный документ с использованием электронно-цифровой подписи (невозможность отказа от авторства и доказательное подтверждение авторства документа);

– обеспечение достоверности и целостности информации, содержащейся в электронном документе, предотвращение случайного или преднамеренного изменения с использованием хеш-функций;

– сокращение количества служб, занятых работой с документами.

Нормативная база. До недавнего времени нормативная база довольно сильно ограничивала использование данных в электронном виде в качестве подлинников [7]. В феврале 2006 года Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации Содружества Независимых Государств утвердил комплекс дополнений и изменений стандартов Единой системы конструкторской документации (КД), регламентирующих вопросы разработки и применения конструкторской документации в электронной форме [8]. Ниже приведены наиболее существенные дополнения и изменения стандартов:

– установлены две равноправные формы представления КД – бумажная и электронная (ГОСТ 2.001–93 «Общие положения»);

– регламентировано, что учет применяемости документов может производиться вручную или автоматизированным способом; подлинники и копии документов в электронной форме хранятся в базах данных автоматизированных систем управления документами и/или на отдельных электронных носителях (ГОСТ 2.501–88 «Правила учета и хранения»);

– указано, что изменение электронного конструкторского документа осуществляется путем его полной замены, и введено использование механизма изменения версий (ГОСТ 2.503–90 «Правила внесения изменений»).

Однако стоит отметить, что некоторые моменты в новых стандартах остались не освещенными. Остался открытым вопрос, что же на самом деле считать электронным подлинником документа. Наверное не совсем корректно считать им файл в формате САПР, так как это, в свою очередь, требует наличия у всех участников документооборота идентичного программного обеспечения. Так, для открытия и просмотра файла на всех компьютерах должно быть установлено программное обеспечение одной и той же версии, с одинаковыми настройками, набором шрифтов и т. д. К примеру, 3D-модель, созданная в среде SolidWorks версии 2012, не может быть открыта в более ранних версиях этой программы. Или текстовый документ, сохраненный в редакторе MS Office Word 2007 в формате docx, не может быть прочитан в MS Office Word 2003.

Концепция информатизации Роскосмоса. Обратимся к концепции информатизации Роскосмоса, утвержденной в марте 2010 года [9], в разработке которой и научных исследованиях, положенных в ее основу, принимали участие специалисты многих организаций и предприятий. Согласно этому документу стоящие перед Роскосмосом и предприятиями ракетно-космической промышленности сложные организационные и научно-технические задачи, связанные с выполнением крупномасштабных проектов по созданию высокотехнологичной наукоемкой продукции в рамках Федеральной космической программы и других государственных и международных программ, требуют от руководства отрасли, научно-производственного и технического персонала обладания эффективными инструментами автоматизации как управленческой, так и производственной деятельности. Практика разработки, внедрения и сопровождения наукоемких проектов за последние годы показывает, что отсутствие единых стандартов, регламентирующих обмен информацией в электронном виде, многоплатформенность и разноплановость информационных систем, неэффективное использование передовых информационно-телекоммуникационных технологий не позволяют оперативно и качественно решать стоящие перед отраслью задачи.

АСУ ИДиП. В соответствии с концепцией информатизации Роскосмоса и политикой предприятия в области качества, а также исходя из развития сквозной комплексной САПР [1], в АО «НПЦ «Полюс» разработана автоматизированная система управления инженерными данными и производством (АСУ ИДиП) [10] на всех этапах жизненного цикла изделия, предназначенная для построения на предприятии единого информационного пространства с целью разработки, согласования, хранения, внесения изменений, обращения электронной технической документации, ведения состава изделия в электронном виде.

АСУ ИДиП построена на следующих стратегических принципах:

1. Выбирается одна программно-аппаратная платформа, на которой разрабатываются все контуры АСУ предприятия. Такой платформой стала система разработки 1С:Предприятие 8, позволяющая легко интегрироваться с любыми готовыми решениями на платформе 1С.

2. Формируются общие данные для каждого контура – электронный состав изделия (ЭСИ). При таком подходе любое изменение ЭСИ со стороны контура управления конструкторской и технологической документацией (ТД) приводит к моментальной реакции в контурах управления производством и финансово-экономическом (рис. 1).

В 2009 г. контур управления КД и ТД АСУ ИДиП внедрен в АО «НПЦ «Полюс» по приказу генерального директора.

Основными функциями данного контура являются:

– оформление подлинников КД и ТД в электронном виде;

– автоматическое формирование электронных альбомов КД по спецификации;

– просмотр любых документов и файлов, находящихся в системе, без использования дополнительного лицензионного программного обеспечения;

– поиск документов по атрибутам и по содержанию;

– параллельное согласование документов в электронной форме;

– проведение изменений в документацию [11].

Электронная техническая документация в АСУ ИДиП. В главной экранной форме (рис. 2) контура управления технической документацией слева в древовидной форме отображаются темы и заказы, внесенные в систему. В центральной части рис. 2 приведен список электронных технических документов (ЭТД) выделенного заказа.

Оперативно обеспечивается доступ к подлиннику любого документа, представляющему собой САПР-независимый, многостраничный графический файл в растровом формате tiff, получаемый из файла САПР напрямую, без привычного сканирования с бумажных подлинников.

Благодаря принятой оптимальной стратегии удалось выстроить логически стройную САПР-независимую систему электронного оборота технической документации [12]. Также с помощью встроенных функций обеспечивается доступ к 3D-модели детали или сборочной единицы, извещению об изменении и комплекту ТД.

Благодаря АСУ ИДиП любой пользователь системы в соответствии с назначенными правами получает online-доступ ко всей технической документации предприятия.

Карточки документа и изменения документа. Для каждого документа, находящегося в системе, создается электронная карточка, содержащая сведения обо всех изменениях, авторе, дате занесения и состоянии изменения.

Рис. 1. Схема построения единого информационного пространства предприятия

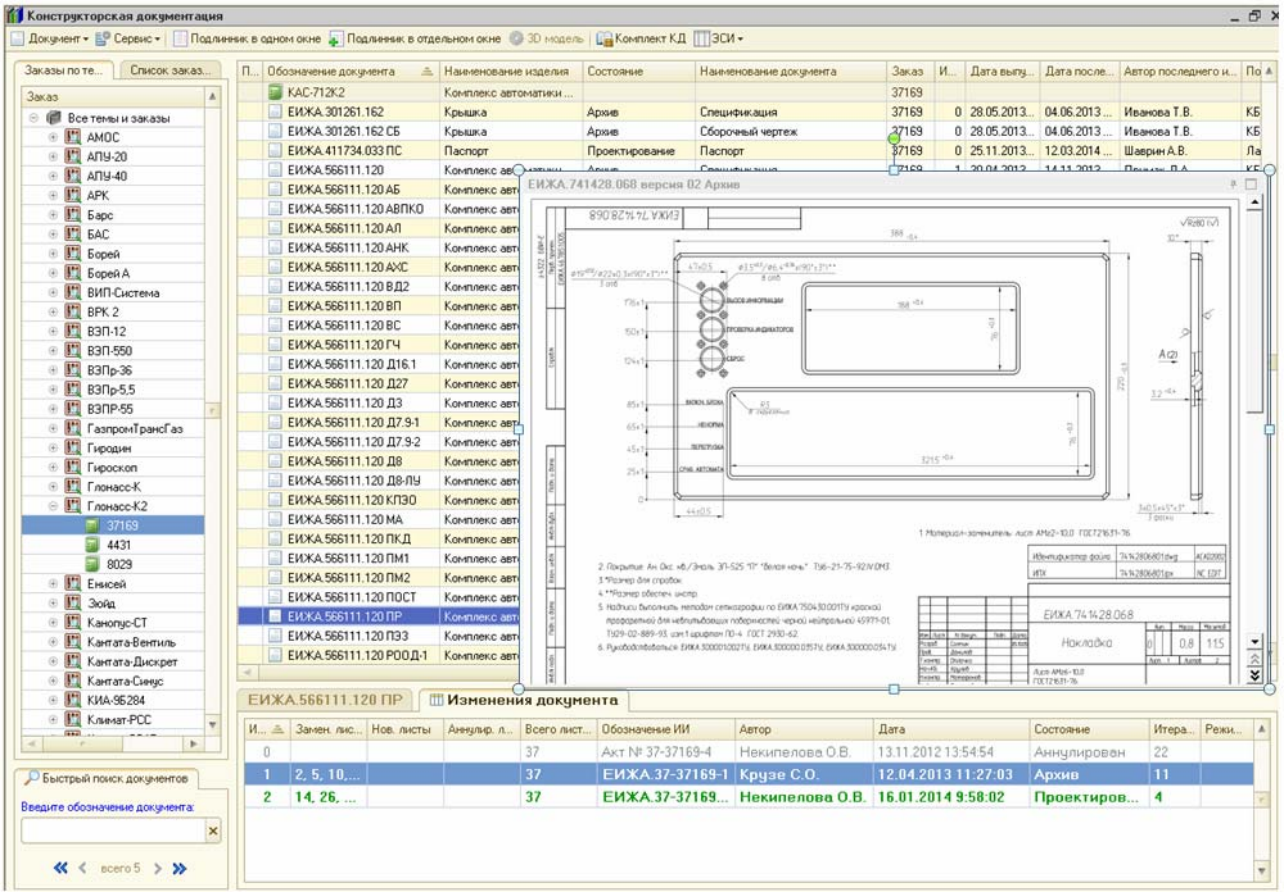


Рис. 2. Экранная форма ЭТД

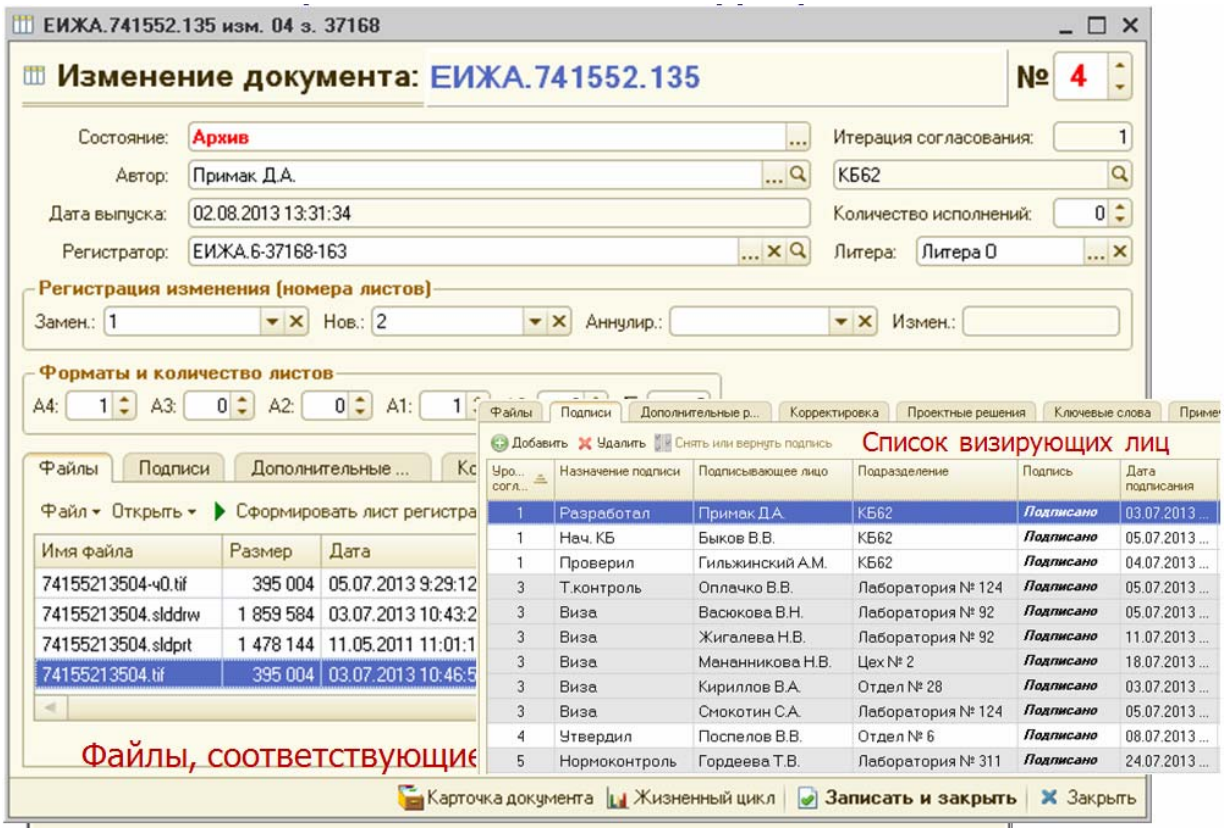


Рис. 3. Электронная карточка изменения документа

При выборе какого-либо изменения открывается карточка изменения документа (рис. 3), в которой, помимо реквизитной части, присутствуют ссылки на все файлы, относящиеся к данному изменению:

– файл-оригинал (САПР-файл), в котором оформлен данный документ;

– файл-подлинник в формате tiff, позволяющий просмотреть документ на любом компьютере и отправить его на печать в неизменном виде;

– файлы-черновики с замечаниями, возникшими при подписании;

– файл – сравнение текущей и предыдущей версий;

– 3D-модель детали (сборочной единицы).

На отдельной вкладке представлен список лиц, визировавших документ, с указанием даты и времени подписания, состояния электронно-цифровой подписи.

Кооперация предприятий в рамках совместного ведения проектов. Основная цель концепции информатизации Роскосмоса – повышение уровня кооперации предприятий в рамках совместного ведения проектов. В АСУ ИДиП разработан механизм, позволяющий осуществлять в электронном виде обмен проектной документацией между предприятиями.

Предприятие – держатель подлинника передает комплект КД в электронном виде предприятию-изготовителю. Предусмотрена возможность передачи документов в зашифрованном виде. В комплект передаваемых файлов входят файл – подлинник электронного технического документа, файл реквизитов передаваемого документа в структурированном виде, файл – сравнение с предыдущим изменением. Обратно при необходимости в таком же формате передаются предварительные извещения. При выпуске новых извещений об изменении (ИИ) системой проставляются отметки о погашении предварительных извещений (ПИ).

Процедура отправки отдельных конструкторских документов в электронном виде прошла проверку на следующих предприятиях: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара), АО «ИСС» (г. Железногорск), ОАО «ГРЦ им. академика В. П. Макеева» (г. Миасс), ОАО «ЦКБМТ «Рубин» (г. Санкт-Петербург), ОАО «ОКБМ «Африкантов» (г. Н. Новгород), ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск) и ОАО «НПО «Гидромаш» (г. Москва). Она внедрена в полном объеме на ФГУП «ПО «Октябрь» (г. Каменск-Уральский) (установка АСУ ИДиП и передача в электронном виде всего комплекта конструкторской документации на изделие).

Схема взаимодействия предприятий. На общей функциональной схеме кооперации в рамках совместного ведения проекта (рис. 4) показано взаимодействие двух предприятий по одному заказу. В принципе, данная схема подходит для любого числа предприятий и неограниченного числа заказов.

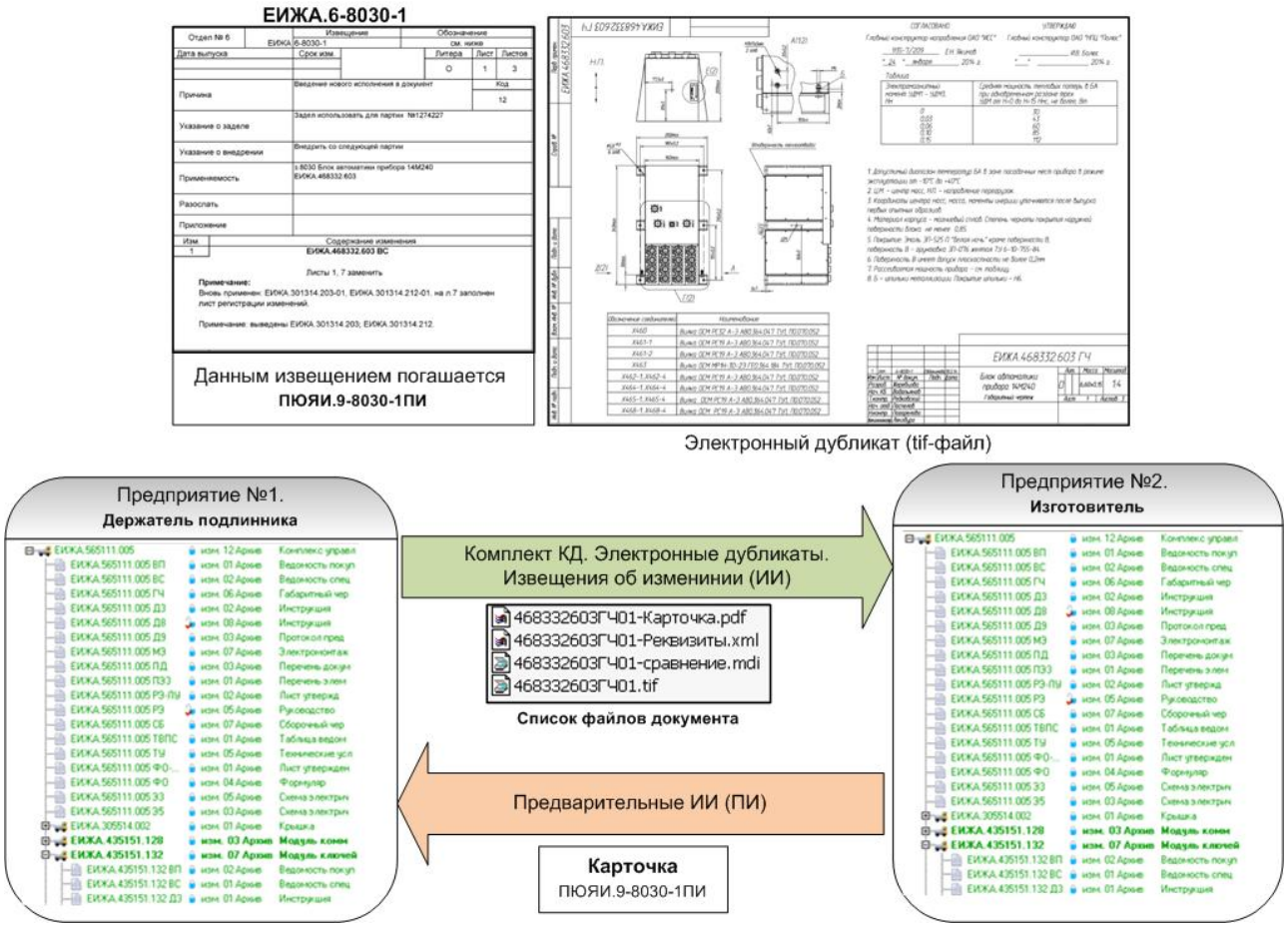


Рис. 4. Функциональная схема взаимодействия предприятий

Порядок работы предприятий в АСУ ИДиП в рамках совместного ведения проектов следующий:

– предприятие – держатель подлинника заказа (далее – предприятие ДПЗ) создает в АСУ ИДиП полный комплект конструкторской документации на заказ;

– предприятие ДПЗ создает zip-архивы на все документы, входящие в заказ;

– предприятие ДПЗ передает предприятию-изготовителю необходимые zip-архивы на заказ;

– предприятие-изготовитель импортирует в АСУ ИДиП полученные zip-архивы на заказ и по этой проектной документации изготавливает заказ или его часть;

– предприятие-изготовитель при необходимости выпускает в АСУ ИДиП ПИ, создает из него zip-архив и отправляет предприятию ДПЗ;

– предприятие ДПЗ импортирует в АСУ ИДиП полученный zip-архив на ПИ;

– предприятие ДПЗ для погашения полученного ПИ корректирует конструкторскую документацию и выпускает соответствующее ИИ;

– предприятие ДПЗ создает zip-архивы на все измененные документы, входящие в заказ, а также zip-архив созданного ИИ;

– предприятие ДПЗ передает предприятию-изготовителю созданные в предыдущем пункте zip-архивы;

– предприятие-изготовитель импортирует в АСУ ИДиП полученные zip-архивы с изменениями на заказ; в информационной базе АСУ ИДиП ставится отметка о погашении соответствующего ПИ.

Структура zip-архива электронного документа. Zip-архив ЭТД представляет собой зашифрованный файл в формате сжатия данных zip. Длина пароля шифрования файла – 32 байта.

В комплект архива ЭТД входят следующие файлы (рис. 5):

– файл – подлинник ЭТД – САПР-независимый, многостраничный графический файл в растровом формате tiff, получаемый из файла САПР напрямую, без привычного сканирования с бумажных подлинников;

– файл реквизитов передаваемого документа в структурированном виде в формате xml;

– файл – сравнение текущего изменения подлинника ЭТД с предыдущим изменением в формате mdi;

– файл карточки документа в формате pdf.

Карточка ЭТД. Карточка ЭТД – это файл в формате pdf (рис. 6).

Кроме этого, в карточке документа содержатся:

– таблица со списком лиц, визировавших документ, с указанием даты и времени подписания;

– таблица со списком файлов, входящих в zip-архив ЭТД, с указанием размера, даты изменения и значения хеш-суммы (MD5) каждого файла.

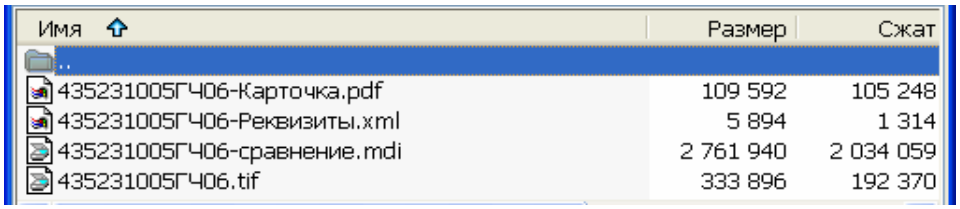
XML-файл реквизитов ЭТД. Для решения задачи создания распределенной информационной системы корпорации реализован универсальный механизм обмена данными в формате XML (Extensible Markup Language). Это язык разметки документов, позволяющий структурировать информацию разного типа, используя для этого произвольный набор инструкций. Основным достоинством XML-документов (рис. 7) является то, что при относительно простом способе создания и обработки они позволяют создавать структурированную информацию, которую хорошо «понимает» разнородное программное обеспечение. Универсальный механизм обмена данными позволяет создавать произвольные распределенные системы и практически не накладывает никаких ограничений на структуру создаваемой системы. Можно как связывать в единое целое базы 1С:Предприятия [13–15] с отличными друг от друга конфигурациями, так и осуществлять обмен с принципиально отличными информационными системами (базами данных).

Подписка в АСУ ИДиП на рассылку изменений документов. Список предприятий, доступных для включения во внешнюю рассылку ЭТД, приведен в справочнике «Организации» (рис. 8). Данный справочник сопровождается администратором системы.

Для того чтобы документ попал во внешнюю электронную рассылку, в его карточке в закладке «Рассылка» должна быть запись об организации – получателе изменений этого документа (рис. 9). Право на внесение таких записей принадлежит сотруднику архива предприятия и администратору системы. Обязательным при процедуре добавления записей является указание «Основания».

После добавления в карточку документа записей по рассылке, при принятии версии документа в архив по комплектному извещению об изменении [11] будет создан zip-архив ЭТД и сгенерированы соответствующие события для отправки его по электронной почте всем организациям, подписанным на данный документ.

Предложение по автоматизации предприятий ракетно-космической промышленности. Целесообразно создание единого отраслевого координационного центра, который бы взял на себя разработку решения по автоматизации управления инженерными данными и производством на всех этапах жизненного цикла изделия с дальнейшим выпуском отраслевого стандарта. В качестве базовой АСУ ИДиП отрасли предлагается универсальное, масштабируемое, расширяемое, с открытым кодом решение АО «НПЦ «Полюс».



Имя	Размер	Сжат
..		
435231005ГЧ06-Карточка.pdf	109 592	105 248
435231005ГЧ06-Реквизиты.xml	5 894	1 314
435231005ГЧ06-сравнение.mdi	2 761 940	2 034 059
435231005ГЧ06.tif	333 896	192 370

Рис. 5. Список файлов zip-архива ЭТД

Реквизит	Значение
Предприятие	ОАО "НПЦ "Полюс"
Заказ	ПУА
Обозначение документа	ЕИЖА.468364.585 ГЧ
Литера	
Наименование изделия	ПУА
Вид документа	Габаритный чертеж
Номер изменения	2
Извещение об изменении	ЕИЖА.6-4419-8
Количество листов	4
Инвентарный номер подлинника	э4218-2
Дата сдачи в архив	29.01.2014 16:23:47

Рис. 6. Список файлов zip-архива ЭТД

435231005ГЧ06-Реквизиты.xml

```
01 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
02 <Корневой РеквизитыДокумента="Значение">
03     <!--Выгрузка реквизитов документа-->
04     <ВерсияСтруктурыФайлаXML>1.20</ВерсияСтруктурыФайлаXML>
05     <Организация>ОАО "НПЦ "Полюс"</Организация>
06     <Заказ>ППВЭ-19</Заказ>
07     <ПризнакДокумента>КД</ПризнакДокумента>
08     <ОбозначениеДокумента>ЕИЖА.435231.005 ГЧ</ОбозначениеДокумента>
```

Рис. 7. Фрагмент XML-файла реквизитов ЭТД

Справочник Организации

Действия

К	Наименование	Полное наименова...	Адрес	Код орган...	Код ОК...	Код...	Код ОК...	E-mail
1	ОАО "НПЦ "Полюс"	Открытое акционер...	634050, Россия, г. Томск, пр. Кирова ...	ЕИЖА	057767...	643	0217149	polus@online.tomsk.net
2	Омск "СПС"	Открытое акционер...						oaospsotd@mail.ru
3	ОАО "ГРЦ Макеева"	Государственный р...	436300, Россия, г. Миасс, Тургоякско...					src@makeyev.ru
4	ОАО "ИСС"	Открытое акционер...	662972, Россия, г. Железногорск, ул. ...					office@iss-reshetnev.ru
5	ЦКБМТ ОАО "Рубин"	Центральное Конст...	191119, Россия,					neptun@ckb-rubin.ru
6	ОАО "НПО "Гидромаш"	Открытое акционер...	129626, Россия, г. Москва, 2-я Мытищ...					info@gidromash.com.ru
7	ФГУП ПО "Октябрь"	ФГУП ПО "Октябрь"	г. Каменск-Уральский	ПЮЯИ				it@neywa.ru
8	ООО "НТК "Криогенная техника"	Общество с ограни...	644105, г. Омск-105, ул. 22 Партсъезд...					info@cryontk.ru
9	ОАО "ОКБМ "Африкантов"	ОАО "ОКБМ "Африк...	603074, Россия, г. Н.Новгород, Буран...					okbm@okbm.nnov.ru

Рис. 8. Справочник «Организации»

ЕИЖА.436437.068 ГЧ з. 361047

Карточка документа: ЕИЖА.436437.068 ГЧ

Заказ 361047 **Статический преобразователь напряжения СПН5/20**

Наименование изделия: **Статический преобразователь напряжения СПН5/20**

Вид документа: Габаритный чертеж

Обозначение изделия: ЕИЖА.436437.068 Исполнение 0

Состояние: **Архив**

Изменения документа | Реквизиты | Дополнительные... | Применяемость | Ссылается на... | Рассылка

Учт...	Кому	Основание	Дата	Запись добавил
✔	ОАО "ГРЦ Макеева"	Служебная записка №122 от 15.04.14	22.04.2014 13:34:06	Черватюк В.Д. Зам.Admin.
✔	ФГУП ПО "Октябрь"	Решение №362/36-2014-01	08.05.2014 8:21:12	Черватюк В.Д. Зам.Admin.

Список КД | Доступ | Закрыть

Рис. 9. Внешняя электронная рассылка ЭТД

Рис. 10. Схема взаимодействия предприятий

Базовая АСУ ИДиП поставляется на заинтересованные предприятия с открытым кодом, силами отделов информационных технологий на местах при активной поддержке координирующей службы разрабатываются отдельные модули, которые включаются в основное решение и распространяются на другие участвующие в проекте предприятия. Таким образом, совместно создается отраслевое решение, которое одновременно проходит апробацию на разных предприятиях (рис. 10).

Реализованный в АО «НПЦ «Полюс» при создании АСУ ИДиП системный подход позволит предприятиям отрасли формировать отраслевое решение на отечественной платформе, повышать уровень кооперации, реализовать единую структуру управления процессами информатизации и автоматизации на основе общих принципов и механизмов. При этом необходимо решить вопросы передачи в зашифрованном виде конфиденциальной информации.

Заключение. Разработанная в АО «НПЦ «Полюс» АСУ ИДиП на всех этапах жизненного цикла изделия, предназначенная для построения на предприятии единого информационного пространства с целью разработки, согласования, хранения, внесения изменений, обращения электронной технической документации, ведения состава изделия в электронном виде, позволяет существенно повысить эффективность и качество разрабатываемых изделий на приборостроительных и машиностроительных предприятиях. Заложенные в АСУ ИДиП механизмы позволяют развивать начатый проект до уровня отраслевого решения.

Библиографические ссылки

1. Алексеев В. П., Коблов Н. Н., Хрулев Г. М. Современные технологии автоматизации проектирования РЭА специального назначения. Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2003. 134 с.

2. Петунин А. А. Промышленные системы автоматизированного проектирования : методические материалы по изучению курса «Разработка САПР» для студентов специальности САПР. Екатеринбург : Изд-во УГТУ, 1998.

3. ГОСТ 19.602–78. Единая система программной документации. Правила дублирования, учета и хранения программных документов, выполненных печатным способом. М. : Изд-во стандартов. 1978.

4. Аналитический отчет Tech-Clarity [Электронный ресурс]. URL: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/Images/20815_tcm802-94756.pdf (дата обращения: 01.09.2014).

5. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Информационные технологии в проектировании и производстве. СПб. : Политехника, 2008.

6. CALS-технологии [Электронный ресурс]. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-технологии (дата обращения: 01.09.2014).

7. Ширяев Н. К вопросу о соблюдении требования ЕСКД и международных стандартов при внедрении PLM-решений в машиностроении // САПР и графика. 2009. № 5. С. 74–76.

8. Кондрашина С. ЕСКД. Грядут большие перемены… // САПР и графика. 2006. № 5. С. 47.

9. Концепция информатизации Роскосмоса : утверждена 01.03.2010 г. [Электронный ресурс] // Федеральное космическое агентство. URL: http://www.federalspace.ru/main.php?id=13&did= 928&print=1 (дата обращения: 01.09.2014).

10. Коблов Н. Н. Разработка и внедрение автоматизированной системы управления инженерными данными // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. XVIII науч.-техн. конф. (22–23 апр. 2010, г. Томск). Томск : ООО «Печатная мануфактура», 2010. С. 228–230.

11. Коблов Н. Н., Черватюк В. Д., Чекрыгин С. С. Повышение эффективности проведения изменений в конструкторской документации // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (14–15 февр. 2013, г. Томск). Томск, 2013. С. 213–215.

12. Разработка и оформление конструкторской документации для радиоэлектронной аппаратуры : справочник / Э. Т. Романычева [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1989. 448 с.

13. Профессиональная разработка в системе 1С:Предприятие 8 / А. П. Габец [и др.]. М. : ООО «1С-Паблишинг» ; СПб. : Питер, 2007. 808 с.

14. Габец А. П. Решение оперативных задач : метод. материалы для слушателя сертифицированного курса. М. : ООО «1С-Учебный центр № 3», 2004. 116 с.

15. Белоусов П. С., Островерх А. В. 1С:Предприятие от 8.0 до 8.1. М. : 1С-Паблишинг, 2008. 286 с.

References

1. Alekseev V. P., Koblov N. N., Hrulev G. M. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii proektirovaniya REA spetsial'nogo naznacheniya.* [Modern technologies of automation of designing of REE of a special purpose]. Tomsk, Izd-vo Instituta optiki atmosfery SO RAN Publ., 2003, 134 p.

2. Petunin A. A. *Promyshlennye sistemy avtomatizirovannogo proektirovanija. Metodicheskie materialy po izucheniju kursa "Razrabotka SAPR" dlja studentov special'nosti SAPR* [Industrial of system of the automated designing. Methodical materials on course studying "Working out SAPR" for students of speciality SAPR]. Ekaterinburg, UGTU Publ., 1998.

3. *GOST 19.602–78. Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii. Pravila dublirovaniya, ucheta i khraneniya programmnykh dokumentov, vypolnennykh pechatnym sposobom.* [State Standard 19.602–78. Uniform system of the program documentation. Rules of duplication, the account and storage of the program documents executed in the printing way]. Moscow, Standartinform Publ., 1978.

4. *Analiticheskij otchet Tech-Clarity* [Analytical report Tech-Clarity] (In Russ.). Available at: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/Images/20815_tcm802-94756.pdf (accessed 01.09.2014).

5. Zil'berburg L. I., Molochnik V. I., Jablochnikov E. I. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in designing and manufacture]. St. Petersburg, Politekhnika Publ., 2008.

6. *CALS-tehnologii* [CALS-technologies]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/CALS-техно-логии (accessed 01.09.2014).

7. Shiryaev N. [To a question on observance of requirements of ESKD and the international standards at introduction of PLM-decisions in mechanical engineering]. *SAPR i grafika*. 2009, no. 5, p. 74–76 (In Russ.).

8. Kondrashina S. [ESKD. Main recesses …]. *SAPR i grafika*. 2006, no. 5, p. 47 (In Russ.).

9. *Koncepcija informatizacii Roskosmosa, utverzhdena 01.03.2010* [The concept of information Roskosmos, is confirmed 01.03.2010] (In Russ.). Available at: http://www.federalspace.ru/main.php?id=13&did=928&print=1 (accessed 01.09.14).

10. Koblov N. N. *Razrabotka i vnedrenie avtomatizirovannoj sistemy upravlenija inzhenernymi dannymi* [Working and introduction of the automated control system by engineering data]. *Jelektronnye i jelektromehanicheskie sistemy i ustrojstva: tez. dokl. XVIII nauch.-tehn. konf. Tomsk, 22–23 apr. 2010 g.* [Electronic and electromechanical systems and devices: theses of the report of XVIII scientific and technical conference. Tomsk, on April, 22–23nd 2010]. Tomsk, 2010, p. 228–230.

11. Koblov N. N., Chervatjuk V. D., Chekrygin S. S. [Increase of efficiency of carrying out of changes in the design documentation]. *Jelektronnye i jelektromehanicheskie sistemy i ustrojstva: tez. dokl. nauch.-tehn. konf. molodyh specialistov.* [Electronic and electromechanical systems and devices: theses of reports of scientific and technical conference of young experts]. Tomsk, on February, 14–15th 2013. Tomsk, 2013, p. 213–215 (In Russ.).

12. Romanycheva Je. T. *Razrabotka i oformlenie konstruktorskoy dokumentatsii dlya radioyelektronnoy apparatury: spravochnik* [Radio electronics construction documentation design]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1989, 448 p.

13. Gabets A. P. et al. *Professional'naya razrabotka v sisteme 1S:Predpriyatie 8* [Professional working out in system 1C: Enterprise 8]. Moscow, 1C-Pablishing, 2007, 808 p.

14. Gabets A. P. *Reshenie operativnykh zadach: metod. materialy dlja slushatelja sertifitsirovannogo kursa* [The decision of operative problems: methodical materials for the listener of the certificated course]. Moscow, 1C-Pablishing, 2004, 116 p.

15. Belousov P. S., Ostroverh A. V. *1S:Predpriyatie ot 8.0 do 8.1* [1C:Enterprise from 8.0 to 8.1]. Moscow, 1C-Pablishing, 2008, 286 p.

© Коблов Н. Н., Черватюк В. Д., 2015

УДК 62-506.1

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 62–71

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ КЛАССА ГАММЕРШТЕЙНА

Н. В. Коплярова*, А. В. Медведев

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

Рассмотрены задачи идентификации и управления нелинейными динамическими процессами класса Гаммерштейна в условиях частичной непараметрической неопределенности. В настоящее время наиболее широко распространенный подход к идентификации и управлению подобными системами состоит в параметризации как линейного динамического звена, так и нелинейного. При построении модели системы Гаммерштейна естественно используются наблюдения входных и выходных переменных с шумами. После предварительной параметризации модели обычно следует этап оценки параметров, входящих в последнюю. Очевидно, что недостаточно точная параметризация модели чревата тем, что качество управления такой системой может оказаться неудовлетворительным. Настоящая статья посвящена исследованию случая, когда уравнение линейного блока процесса не известно с точностью до параметров, а известно лишь, что процесс является линейным, а нелинейный блок задан с точностью до параметров. Такая постановка вопроса делает рассматриваемую систему более адекватной задачам практики. На первом этапе строится модель линейного динамического блока. Для построения непараметрической модели последнего необходимо на вход объекта подать функцию Хевисайда, в этом случае выход объекта с точностью до коэффициента является его переходной функцией. Восстановление весовой функции осуществляется по наблюдениям переходной методами непараметрической статистики. Для оценки параметров нелинейного звена необходимо проведение соответствующих экспериментов. Далее рассматривается задача управления системой Гаммерштейна, приводятся соответствующие непараметрические алгоритмы управления для случаев, когда нелинейное звено представляет собой квадратор. Следует обратить особое внимание на то, что при идентификации нелинейной динамической системы класса Гаммерштейна контролю подлежат только входные и выходные переменные. При изготовлении средств космической техники часто сталкиваются с необходимостью управления подобными объектами. Рассматриваемые модели и непараметрические алгоритмы управления оказываются полезными при создании компьютерных систем технической диагностики при виброиспытании космических аппаратов (КА) по каналу «вибросигнал – сигнал датчика, установленного на КА», а также систем управления производственными и технологическими процессами аэрокосмической техники. Проведено численное исследование предложенных алгоритмов управления для дискретно-непрерывных систем класса Гаммерштейна в различных условиях (при различном уровне помех в каналах измерения, различном объеме выборки и видах входных воздействий). Результаты компьютерных исследований показывают работоспособность предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: априорная информация, непараметрическая идентификация, управление, нелинейная динамическая система, модель Гаммерштейна.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 62–71

NONPARAMETRIC ALGORITHMS OF HAMMERSTEIN SYSTEM CONTROL

N. V. Koplyarova*, A. V. Medvedev

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

The task of identification and control of nonlinear dynamic processes Hammerstein class in partial non-parametric uncertainty is considered. Currently, the most widely used approach to the identification and management of such systems is the parameterization as a linear dynamic level, and non-linear. When building a model of the system Hammerstein the input and output variables with noise are naturally used. After pre-parameterization of the model, an evaluation phase of the parameters in the latter is usually followed. Obviously, that not enough accurate parameterization of the model is fraught with the fact that the quality of the management of such a system may not be satisfactory. This article is devoted to investigation of the case, the equation of linear block process is not known with an accuracy of pa-

rameters, and we only know that the process is linear and non-linear unit set up to parameters. This approach makes the system under consideration more than adequate to problems of practice. At the first stage model of linear dynamic block is built. To construct a non-parametric model of the last input object must submit the Heaviside function, in this case, the output of the object to within a factor is its transition function. Reconstruction of the weight function is carried out by the observations of transitional methods of nonparametric statistics. To estimate the parameters of non-linear element it is necessary to conduct appropriate experiments. Next, we consider the problem management system Hammerstein, given appropriate non-parametric control algorithms for cases where non-linear element is a quad. We should pay particular attention to the fact that in the identification of nonlinear dynamic system class Hammerstein, subject only to the control input and output variables. In the manufacture of space capabilities are often faced with the need to manage such objects. These models and nonparametric control algorithms are useful in creating computer systems of technical diagnostics with vibration testing of spacecraft (SC) on the channel: Vibrate - sensor mounted on the spacecraft, as well as systems of production and technological processes of aerospace technology. A numerical investigation of the proposed control algorithms for discrete-continuous systems class Hammerstein under different conditions (at different levels of noise in the measurement channels, a different sample size and types of input actions) has been conducted. The results of computer studies show the efficiency of the proposed algorithms.

Keywords: a priori information, nonparametric identification, control, nonlinear dynamic system model Hammerstein.

Введение. Существующая ныне теория автоматического управления в основном относится к разряду параметрических, т. е. к случаю, когда вид уравнения, описывающего объект (процесс), задан с точностью, описываемой до вектора параметров. Но зачастую априорной информации недостаточно, чтобы определить порядок уравнения линейного динамического блока системы класса Гаммерштейна, в отличие от нелинейного блока, параметрический вид которого определен. Это обстоятельство делает актуальным настоящее исследование в связи с тем, что для определения порядка уравнения, описывающего процесс, необходимо дополнительно проводить цикл исследований, связанных с идентификацией в «узком смысле». Это направление в настоящее время достаточно интенсивно развивается [1–5].

Для случая, когда порядок уравнения, описывающего линейный динамический блок, не определен, естественно использовать непараметрические модели и соответствующие алгоритмы управления [6]. В этом случае требуется «снятие» соответствующих переходных характеристик, необходимых для построения непараметрических моделей динамических процессов. Ключевым звеном дальнейшего является «включение» на входе объекта непараметрического алгоритма управления, являющегося по существу «обратным» к непараметрической модели, являющейся достаточно точным описанием нелинейной системы. С математической точки зрения это соответствует постановке обратного оператора на входе объекта, который интерпретируется как оператор управляемого процесса [7]. Конечно же, речь идет в данном случае не о точном операторе объекта, а об его приближении и, соответственно, об аппроксимации обратного оператора на основании наблюдений «входа-выхода» объекта. Дальнейшее изложение и будет посвящено непараметрическим моделям систем типа Гаммерштейна и соответствующим алгоритмам управления. Постановка задачи исследования нелинейных систем класса Гаммерштейна в условиях частичной неопределенности приближает ее решение к реальности. Подобные задачи возникают, например, при создании компьютерных систем управления технологическими процессами космической отрасли, а также других производств, где доминируют дискретно-непрерывные технологические процессы. В частности, при проведении виброиспытаний космических аппаратов канал «вибросигнал – сигнал датчика, установленного на космическом аппарате» может представлять собой нелинейное динамическое звено.

Постановка задачи идентификации. Рассматривается задача идентификации и управления динамических систем класса Гаммерштейна в условиях частичной параметризации. Пусть исследуемый объект может быть описан как последовательное сочетание нелинейных статических и линейных динамических блоков (модель Гаммерштейна). Линейный динамический блок модели воспроизводит динамические свойства исследуемого объекта, нелинейный блок – имитирует его нелинейные свойства [8]. Сложность в исследовании таких объектов заключается в том, что значения промежуточных сигналов (значения выхода блока, находящегося первым в последовательности) недоступны для измерения. Кроме того, порядок и параметры уравнения, описывающего линейный динамический блок системы, неизвестны. В общем виде задача идентификации систем класса Гаммерштейна может быть описана схемой, представленной на рис. 1 [9], где приняты следующие обозначения: Объект – нелинейная динамическая система, состоящая из линейной динамической (ЛЭ) и нелинейной статической (НЭ) частей, ИУ – измерительное устройство, $u(t)$ – входная переменная объекта, $x(t)$ – выходная переменная, u_t^{ξ}, x_t^{ξ} – соответствующие наблюдения переменных процесса в дискретный момент времени, которые из соображения простоты далее будем обозначать $\{u_i, x_i,\ t = 1, s\}$, $\xi(t)$ – ненаблюдаемое случайное воздействие, $\varepsilon^u(t), \varepsilon^x(t)$ – случайные факторы (помехи), действующие в каналах измерения переменных в дискретные моменты времени t, такие, что $M\{\varepsilon\} = 0$, $D\{\varepsilon\} < \infty$, $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта, $w(t)$ – выходная переменная нелинейного элемента системы (неизмеряемая).

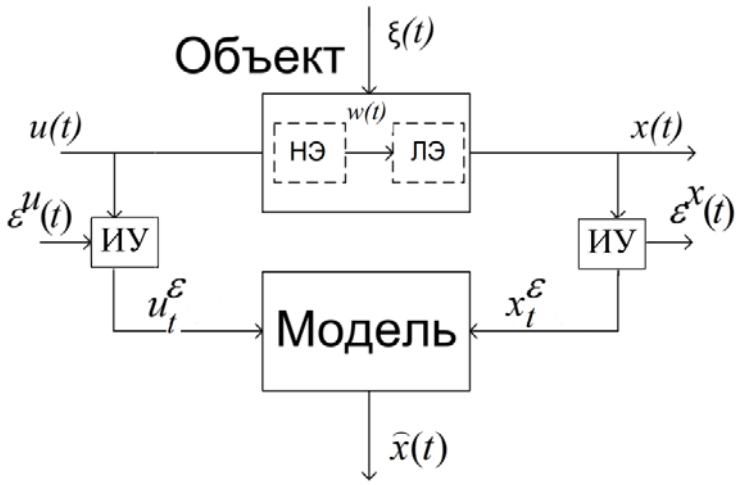


Рис. 1. Общая схема задачи идентификации

Исходные данные о состоянии исследуемого объекта составляют выборку измерений реакции объекта на входное воздействие $u(t)$: $\left\{u_i, x_i,\ i=\overline{1,s}\right\}$. Параметры и порядок дифференциального уравнения, которым может быть описана линейная динамическая часть системы, неизвестны. Пусть нелинейность в объекте описывается некоторой функцией, вид которой предполагается известным с точностью до набора параметров.

Исследователь имеет возможность проведения эксперимента, т. е. может подавать на вход исследуемого объекта некоторые воздействия и измерять его реакцию на них. Требуется на основании наблюдений «входа-выхода» построить модель данной системы, адекватно описывающую ее поведение в различных условиях. Решение задачи идентификации нелинейной системы в описанной постановке может быть разделено на два этапа. На первом этапе предлагается оценить параметры нелинейного звена и переходной характеристики линейного динамического элемента, а на втором – построить требуемую математическую модель исследуемого объекта.

Постановка задачи управления. Задача управления состоит в том, чтобы посредством выбора входного воздействия обеспечить желаемое поведение выходного сигнала системы. Схема большинства систем управления основана на применении принципа обратной связи, т. е. в системе при формировании управляющего воздействия вычисляется разность (ошибка) между желаемым значением выходной переменной и измерением ее действительного значения. Основная проблема решения задачи управления в данной постановке состоит в том, что регуляторы в данном случае формируют управляющее воздействие только на основании сравнения значений выхода объекта и задающего воздействия. Таким образом, настроенные параметры регулятора могут оказаться такими, что цель управления не будет достигаться в случае, если изменятся какие-то характеристики исследуемого объекта или его окружающая среда. То есть регулятор не может подстраиваться под конкретный объект и частную ситуацию управления им. Такие системы управления могут обладать недостаточной гибкостью в приспособлении к изменению условий эксплуатации.

В связи с этим разработаны также подходы к управлению, основанные на принципе адаптации. При анализе и синтезе систем управления такого класса используются математические модели физических объектов. То есть постановка задачи при этом предполагает наличие некоторой модели объекта и цели управления [10]. На основе использования модели в дальнейшем строятся алгоритмы адаптивного управления. Методы адаптивного управления служат для построения систем управления и условий его функционирования (характеристик среды), имеющихся на стадии проектирования или до начала эксплуатации системы. Необходимость в адаптивных системах управления возникает в связи со сложностью задач управления при отсутствии практической возможности подробного изучения и описания процессов, протекающих в объектах управления. Выбор модели объекта при этом зависит от условий, в которых он находится и от исходной информации, доступной исследователю. Априорная информация об исследуемом объекте включает информацию об операторе, описывающем объект, случайных помехах, функции цели, ограничениях.

В общем виде система управления объектом представлена на рис. 2, где Объект – объект управления, УУ – регулятор (устройство управления), x – выходная величина, u – входная величина (управляемый параметр), μ – неуправляемый параметр, x^* – заданное желаемое состояние выхода объекта, $\xi(t)$ – случайное воздействие на объект, ξ_u, ξ_μ, ξ_x – аддитивные помехи в каналах измерений.

Имеются статистически независимые наблюдения входных и выходных переменных исследуемого процесса $\left\{x_i, u_i\right\}$, $i=\overline{1,s}$, где s – объем выборки. На основании имеющихся априорных сведений и непараметрической модели требуется построить регулятор, который будет формировать управляющее воздействие, переводящее систему из начального состояния в желаемое. Таким образом, необходимо найти такое

множество $\{u_i^*\}$ значений управляющего воздействия $u(t)$, для которого справедливо выражение $x(u_i^*) \approx x_i^*$.

Рассматривается задача, когда объект управления находится в следующих условиях: неизвестна структура модели, но известны некоторые сведения качественного характера о процессе – однозначность его характеристик, тип нелинейности динамического процесса. В случае системы с независимым (пассивным) накоплением информации [7] необходимо наличие выборки «входных-выходных» переменных $\{u_i, x_i\}$, $i = \overline{1,s}$, наблюдения в которой предполагаются статистически независимыми. Для решения задач идентификации на этом уровне априорной информации применяются методы непараметрической статистики.

Рассматриваются задачи управления нелинейными динамическими объектами, имеющейся априорной информации о которых недостаточно для построения систем управления с заданными показателями качества. Для линейных систем существует мощный и удобный математический аппарат, позволяющий проводить их анализ и синтез, однако все эти методы не применимы или ограниченно применимы для нелинейных систем, динамика которых описывается нелинейными дифференциальными или разностными уравнениями.

Непараметрическая модель системы типа Гаммерштейна. Будем исследовать системы, которые могут быть представлены в виде модели Гаммерштейна [8]. Пусть порядок и параметры линейной динамической части системы неизвестны, а структура нелинейного элемента задана с точностью до набора параметров α. Основная идея алгоритма, предлагаемого для построения моделей таких систем, заключается в использовании непараметрических оценок для описания связей системы, информация о которых по каким-то причинам неизвестна (в данном случае измерению недоступна линейная динамическая часть системы), а также в применении непараметрического подхода к оцениванию функций.

Считается, что помехи в каналах измерения приведены к выходу и вход $u(t)$ известен точно, а выход $x(t)$ измеряется со случайными ошибками, имеющими нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию. Выход нелинейного элемента $w(t)$ измерению недоступен.

Система находится в условиях, когда параметризованная структура ЛЭ неизвестна, а нелинейная характеристика НЭ известна с точностью до набора параметров. Необходимо на основании измерений выхода объекта при известном входном воздействии построить модель, удовлетворяющую условию минимума квадратичного критерия оптимальности [9].

Как видно из рис. 3, связь между входной $u(t)$ и выходной $x(t)$ переменными объекта при нулевых начальных условиях может быть описана уравнениями вида

$$w(t) = f(u(t)),$$

$$x(t) = \int_0^t h'(t-\tau)w(\tau)d\tau, \qquad (1)$$

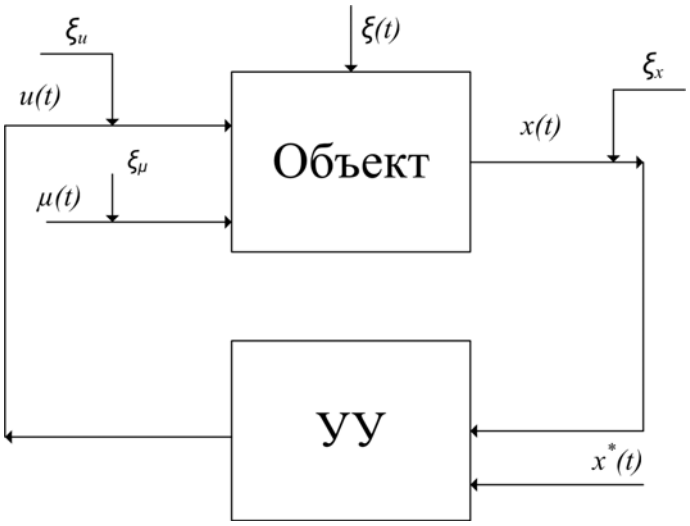


Рис. 2. Общая схема алгоритма управления

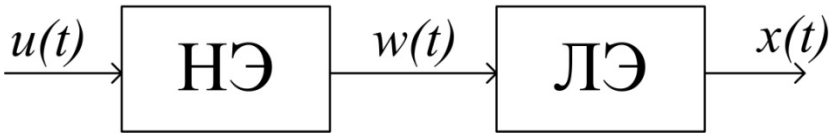


Рис. 3. Схема нелинейной системы: ЛЭ – линейная динамическая часть; НЭ – нелинейный элемент системы; $u(t)$ – входное воздействие; $w(t)$ – выход промежуточного звена объекта; $x(t)$ – выход объекта

Или, исключая переменную $w(t)$,

$$x(t)=\int_0^t h'(t-\tau)f(a,u(\tau))d\tau, \qquad (2)$$

где $h(t)$ – переходная функция линейного динамического элемента; $f(u)$ – нелинейная функция, заданная с точностью до вектора неизвестных параметров a.

Обозначим $x^1(t)$ реакцию нелинейного объекта на входной сигнал в виде функции Хевисайда $u(t)=1(t)$, $x(t)$ – реакция объекта на некоторый тестовый сигнал, форма которого отличается от ступенчатого. Измерения сигналов $x^1(t)$ и $x(t)$ в дискретные моменты времени образуют выборки наблюдений соответственно $\{u_i, x^1{}_i\}$ и $\{u_i, x_i\}_i, i=\overline{1,s}$, s – объем выборки.

Сначала рассматривается задача идентификации ЛЭ. Ступенчатый сигнал $u(t)$ = 1 после прохождения нелинейного элемента сохраняет ступенчатую форму, но меняет амплитуду, т. е. $w(t,u(t)=1)=f(1(t))=d$, где d = const – некоторая константа. Выход нелинейной системы $x(t)$ в соответствии с (2) при единичном входном сигнале запишется в следующем виде:

$$x^1(t)=\int_0^t h^{1'}(t-\tau)1(\tau)d\tau=\int_0^t k^1(t-\tau)1(\tau)d\tau. \qquad (3)$$

Тогда $x^1(t)$ можно рассматривать как переходную функцию некоторой линейной системы с весовой функцией $k^1(t)=dh^1(t)$. Таким образом, импульсная переходная функция $k^1(t)=\frac{d}{dt}x^1(t)$ и ее оценка $\hat{k}^1(t)$ может быть получена на основе выборки $(x^1{}_i, t_i, i=\overline{1,s})$ следующим образом:

$$\hat{k}^1(t)=\sum_{i=1}^{s} x_i^1 H'\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right). \qquad (4)$$

Модель нелинейной системы (2) можно записать в виде

$$\hat{x}(t)=\int_0^t \hat{k}^1(t-\tau)w(\tau)d\tau=\int_0^t \hat{k}^1(t-\tau)f(u(\tau),\bar{a})d\tau. \qquad (5)$$

С учетом оценки $\hat{k}^1(t)$ данная модель примет вид

$$\hat{x}(t)=\frac{1}{sc_s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t} x_i^1\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)\hat{f}(u(\tau_j))\Delta\tau, \qquad (6)$$

где x_i^1 – реакция исследуемого объекта на единичное входное воздействие. Алгоритм оценки параметров a функции $f(u)$ зависит от типа нелинейности в системе.

Модель типа Гаммерштейна с квадратором. Пусть имеем систему, представленную в виде модели Гаммерштейна. Причем нелинейная часть системы представляет собой квадратор, описываемый функцией вида $f(u)=au^2$, где a = const. Выход НЭ вычисляется следующим образом: $w(t)=f(u,a)=au^2$. При единичном входном воздействии $u(t)$ = 1(t) выход нелинейного элемента системы равен $w(t)$ = a. Выход нелинейного объекта $x^1(t)$ тогда рассчитывается следующим образом:

$$x^1(t)=\int_0^t h'(t-\tau)w(\tau)d\tau= \\ =a\int_0^t h'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau=a\int_0^t h'(t-\tau)d\tau. \qquad (7)$$

Таким образом, выход $x^1(t)$ при $u(t)$ = 1 может быть рассмотрен как оценка переходной функции линейного элемента, значение которой умножено на некоторый коэффициент, т. е. $x^1(t)=a\cdot h(t)$. Тогда переходная функция ЛЭ оценивается следующим образом:

$$\hat{h}(t)=x^1(t)/a. \qquad (8)$$

При произвольном входном воздействии и нулевых начальных условиях выход линейной части системы описывается выражением (1). С учетом рассчитанного значения переходной функции (8) модель нелинейного динамического объекта примет вид

$$\hat{x}(t)=a\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau=\int_0^t \hat{x}^1(t-\tau)u^2(\tau)d\tau. \qquad (9)$$

Далее приводится расчетная непараметрическая модель нелинейного объекта, представленного в виде модели Гаммерштейна с квадратором:

$$\hat{x}(t)=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau}\hat{x}_i^1 H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u^2(\tau_j)\Delta\tau, \qquad (10)$$

где x_i^1 – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие; $u(t)$ – входное воздействие.

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему Гаммерштейна, состоящую из квадратора с параметром a = 3 и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект): $3\cdot x''(t)+0,52\cdot x'(t)+1\cdot x(t)=u(t)$. Исходная информация о состоянии объекта, доступная исследователю, представляет собой выборку «входных-выходных» переменных, т. е. описание ЛЭ в виде дифференциального уравнения, а также параметры a НЭ неизвестны. Результаты моделирования данного объекта при различных входных воздействиях представлены на рис. 4.

Анализируя модели нелинейного динамического объекта с видом нелинейности типа квадратора, можно сказать, что непараметрическая модель достаточно хорошо описывает систему при различных значениях параметров нелинейной части объекта в условиях зашумленности выходных каналов связи, при различных входных воздействиях.

Модель типа Гаммерштейна с насыщением. Рассмотрим нелинейную динамическую систему, нелинейность в которой представлена звеном насыщения, т. е. описывается функцией вида

$$f(u)=\begin{cases} u, |u|\le b, \\ a\cdot \mathrm{sign}(u), |u|>b, \end{cases} \qquad (11)$$

где a, b – некоторые неизвестные параметры.

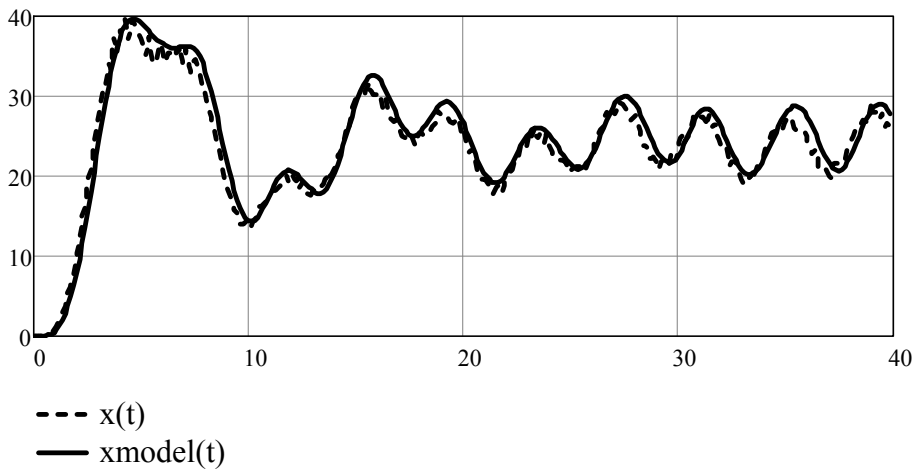


Рис. 4. Результат оценки выхода $x(t)$: $x$model(t) – модель нелинейной системы; x – выход системы; объем выборки s = 300, Δt = 0,117, помеха 5 %, входное воздействие: $u(t)$ = 4sin(0,8t), относительная ошибка моделирования 3,2 %

Модель системы в общем виде может быть описана уравнением вида (1), где неизвестными являются значения параметров a, b функции $f(u)$ и переходная характеристика линейного элемента системы $h(t)$. Учитывая вид нелинейности, в данном случае при $w(t) < b$ выход объекта совпадает с выходом его линейной динамической части $w(t)$. В остальных случаях выход объекта имеет значение a = const, которое возможно определить опытным путем в результате нескольких экспериментов над системой [11]. Далее приводится алгоритм оценивания параметров НЭ и переходной функции ЛЭ $h(t)$.

Подадим на вход объекта единичное воздействие в виде функции Хевисайда $u(t) = 1(t)$, тогда выход нелинейного элемента вычисляется как

$$w^1(t) = \begin{cases} 1, |b| \geq 1, \\ a, |b| < 1. \end{cases} \quad (12)$$

Тогда выход исследуемого объекта имеет значение

$$x^1(t) = \begin{cases} \int_0^t h'(t-\tau)d\tau, |b| \geq 1, \\ a \cdot \int_0^t h'(t-\tau)d\tau, |b| < 1. \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, модель разбивается на две части в зависимости от значения параметра b. Для применения данной модели требуется оценить значения параметров НЭ и переходной функции ЛЭ $h(t)$. Далее рассмотрим каждый из данных возможных случаев подробнее.

Если $|b| < 1$, тогда выход нелинейной системы (обозначенный $x^1(t)$) фактически будет равен величине $x^1(t) = a \cdot \int_0^t \hat{h}'(t-\tau)d\tau$. При этом из теории моделирования линейных динамических систем известно, что если подать на вход модели воздействие $u(t)$ = = 1 (t), получим оценку переходной функции системы, т. е. $\hat{h}(t) = \int_0^t \hat{h}'(t-\tau)1(\tau)d\tau$. Таким образом, учитывая, что $x^1(t) = a \cdot \hat{h}(t)$, выразим оценку переходной функции следующим образом: $\hat{h}(t) = x^1(t)/a$.

Если $|b| \geq 1$, выход нелинейной системы ($x^1(t)$) будет равен значению переходной функции системы:

$$x^1(t) = \int_0^t \hat{h}'(t-\tau)d\tau = \hat{h}(t).$$

Тогда оценка переходной функции нелинейного объекта может быть рассчитана как

$$\hat{h}(t) = \begin{cases} x^1(t), |b| \geq 1, \\ x^1(t)/a, |b| < 1, \end{cases} \quad (14)$$

где $x^1(t)$ – реакция объекта на единичное воздействие (данная величина доступна для измерения); a, b – параметры нелинейного элемента (неизвестны). Параметры функции, описывающей НЭ, предлагается оценить по следующей схеме [12]:

1. Формирование выборки. Проводится серия из m экспериментов, в ходе которых на вход системы последовательно подаются воздействия различной амплитуды $u(t)_j = e_j$, $e_j = \text{const}, j = \overline{1,m}$. При этом если $u(t)_j = e_j$, то выход нелинейного объекта равен $w(t)_j = e_j$, если $e_j < b$, или в противном случае, $w(t)$ = = a·sign(e_j). Выход нелинейного объекта $x(t)_j$ равен значению переходной характеристики линейного элемента $h(t)$, умноженной на некоторый коэффициент. В таблице представлены обобщенные данные о значениях различных переменных нелинейной динамической системы при подаче на ее вход воздействий различной амплитуды.

Обобщение экспериментов для определения параметров нелинейного элемента

$u(t)$	$w(t)$	$x(t)$	$x_{уст}$
e_1	e_1	$x(t)=e_1\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)d\tau=e_1\hat{h}(t)$	$e_1\cdot h_y$
e_2	e_2	$x(t)=e_2\hat{h}(t)$	$e_2\cdot h_y$
e_3	e_3	$x(t)=e_3\hat{h}(t)$	$e_3\cdot h_y$
e_4	e_4	$x(t)=e_4\hat{h}(t)$	$e_4\cdot h_y$
…	…	…	…
$e_k>b$	a	$x(t)=a\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)d\tau=a\hat{h}(t)$	$a\cdot h_y$
…	…	…	…
$e_n>b$	a	$x(t)=a\hat{h}(t)$	$a\cdot h_y$

Таким образом, в результате получим выборку, составленную из значений входных воздействий и установившегося значения выхода нелинейной системы: $\{u_j, x_j^y = x_{уст}\}, j=1,\overline{m}$. На основании этой выборки параметры нелинейного элемента могут быть оценены согласно приведенному алгоритму.

2. Находится расстояние между двумя соседними измерениями:

$$d_j = \left|x_j - x_{j-1}\right| / \Delta t, \qquad j=\overline{1,m},$$

где Δt – шаг дискретизации выборки.

3. Оценивание параметров. Для определенного $j_0 = j$, при котором выполняется соотношение $d_{j_0} < \varepsilon, \varepsilon > 0$, в качестве оценки параметра b принимается значение $\hat{b} = u_{j_0-1}$.

Если $\hat{b} = u_{j_0-1}$, то для оценки параметра a рассматривается оставшаяся выборка $\{u_{j1}, x^y_{j1}\}, j_1 = j_0, ..., m$.

По этой выборке параметр a оценивается следующим образом:

$$\hat{a} = M\{a_{j1}\} = \frac{1}{m-j_0}\cdot\sum_{i=j_0}^{m} x_i.$$

4. Оценка функции. В соответствии с тем, что искомая функция имеет вид звена насыщения, оценка нелинейного элемента примет вид

$$\hat{f}(t) = \begin{cases} u, |u| \le \hat{b}, \\ a\cdot \mathrm{sign}(u), |u| > \hat{b}. \end{cases} \qquad (15)$$

Далее на вход объекта подается некоторая ступенчатая функция, значение которой не превышает порога b – получаем переходную характеристику. Модель линейной части объекта предлагается строить в виде интеграла Дюамеля.

Таким образом, модель нелинейного объекта, выход которой вычисляется как значение функции, описывающей нелинейное звено, аргумент которой – выход модели линейной части объекта [13]:

$$\hat{x}(t) = \int_0^t \hat{h}'(t-\tau)\hat{f}(u(\tau), \hat{a}, \hat{b})d\tau. \qquad (16)$$

Численный вариант данной модели:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t}\hat{h}_i\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)\hat{f}(u(\tau_j))\Delta\tau, \qquad (17)$$

где оценка переходной функции нелинейного объекта рассчитывается как

$$\hat{h}(t) = \begin{cases} x^1(t)/a, & |b| < 1, \\ x^1(t), & |b| \ge 1, \end{cases} \qquad (18)$$

где $x^1(t)$ – реакция объекта на единичное воздействие; a, b – параметры нелинейного элемента, оцененные по алгоритму, описанному выше.

Непараметрический алгоритм управления нелинейной динамической системой класса Гаммерштейна. Рассматривается задача управления нелинейными динамическими системами, которые могут быть представлены в виде модели Гаммерштейна. Пусть линейная часть объекта описывается нелинейным дифференциальным уравнением неизвестного порядка. При этом предполагается, что тип нелинейности известен.

Предлагается непараметрический подход к синтезу регулятора. Описываемый метод предполагает выполнение двух этапов. Первый этап сводится к тому, что по измеренным со случайной ошибкой реализациям управляющего входного и результирующего выходного процессов строится модель динамической системы. Следующий этап состоит в том, что модель объекта используется для получения переходных характеристик обратного оператора системы. Оценка обратного оператора позволяет синтезировать управляющее воздействие для желаемого выходного процесса.

В данном случае схема управления имеет вид, представленный на рис. 5.

Модели такой структуры состоят из разделенных линейной динамической части и нелинейного элемента. При этом можно считать, что объект управления описывается двумя операторами, один из которых является линейным. Линейная часть системы описывается оператором A, нелинейная – оператором B.

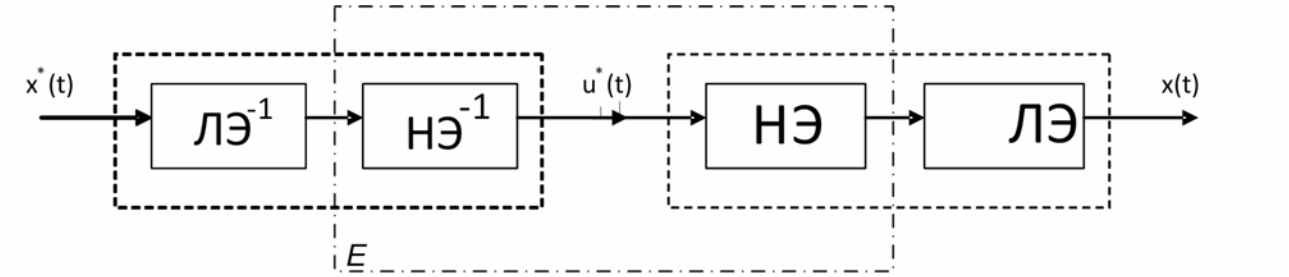


Рис. 5. Схема функционирования непараметрического регулятора: Е – единичный оператор; ЛЭ$^{-1}$ – оператор, обратный к ЛЭ системы; НЭ$^{-1}$ – оператор, обратный к НЭ

То есть:

$$w(t) = B\{u(t)\}, \tag{19}$$

$$x(t) = A\{w(t)\} = A\{B\{u(t)\}\}, \tag{20}$$

где $w(t)$ – выход нелинейного элемента системы; $x(t)$ – выход объекта.

Выход объекта может быть представлен в операторной форме следующим образом:

$$x(t) = A\{B\{u(t)\}\}. \tag{21}$$

Таким образом, управляющее воздействие может быть описано как

$$u = B^{-1}A^{-1}x. \tag{22}$$

При построении модели динамической системы в виде (1) получена оценка функции, описывающей нелинейный элемент системы, следовательно, можно найти оператор B^{-1}.

Оператор A^{-1}, обратный к A, будет также линейным и может быть описан интегралом свертки [7]:

$$u(t) = A^{-1}w(t) = \int_0^t h1(\tau)w(t-\tau)d\tau = \\ = \int_0^t v'(\tau)w(t-\tau)d\tau, \tag{23}$$

где $v(t)$ и $h1(t)$ – соответственно переходная и импульсная переходная функции «обратного» процесса.

В этом случае оператор A представлен выражением (17), а A^{-1} – (18). Оператор B описывает функцию $f(\cdot)$, причем будем предполагать, что существует обратный оператор $B^{-1} = f^{-1}(\cdot)$.

Таким образом, управляющее воздействие вычисляется следующим образом:

$$u*(t) = f^{-1}\left(\int_0^t \hat{h}'^1(t-\tau)x*(\tau)d\tau\right), \tag{24}$$

где $f^{-1}(\cdot)$ – функция, описывающая обратный нелинейный оператор; $v(t)$ – оценка переходной характеристики «обратного» линейного элемента системы, или в дискретном варианте [14]:

$$u^*(t) = f^{-1}\left(\frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\hat{h}_i^1\cdot H'\left(\frac{t_j-t_i}{c_s}\right)\cdot x^*(t_j)h\right). \tag{25}$$

Тогда задача сводится к нахождению обратной переходной функции $v(t)$, которая в данном случае имеет вид

$$\hat{v}(t) = \frac{1-\frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t-1}\hat{h}_i\cdot H'\left(\frac{t_j-t_i}{c_s}\right)\cdot f(u(t_j))\Delta t}{\frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\hat{h}_i\cdot H'\left(\frac{t-t_j-t_i}{c_s}\right)\cdot\Delta t}, \tag{26}$$

где $\hat{h}(t)$ – оценка переходной характеристики линейной части системы.

Далее строим непараметрическую оценку переходной функции линейной части системы в направлении «выход-вход» [15]:

$$\hat{v}(t) = \frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}v_i\cdot H\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right). \tag{27}$$

Управляющее воздействие находится в следующем виде:

$$u^*(t) = \int_0^t \hat{v}'(t-\tau)\hat{w}(\tau)d\tau, \tag{28}$$

или в дискретном варианте:

$$u^*(t) = \frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau}\hat{v}_i\cdot H'\left(\frac{t-t_i-\tau_j}{c_{su}}\right)\times \\ \times\hat{f}^{-1}(x^*(\tau_j))\Delta\tau, \tag{29}$$

где $\hat{v}_i$ – оценка переходной характеристики «обратного» линейного элемента системы; $f^{-1}(\cdot)$ – оценка функции, описывающей нелинейность; $x^*(t)$ – желаемое значение выхода системы.

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему, состоящую из квадратора (параметр a = 2) и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект): $3\cdot x''(t)+1{,}3\cdot x'(t)+1\cdot x(t) = u(t)$. Предполагаем, что вид и параметры реального уравнения, описывающего процесс, неизвестны. Входное воздействие: $u(t)$ = 3cos(0,5t) + sin(0,2t). Результат моделирования такого процесса представлен на рис. 6.

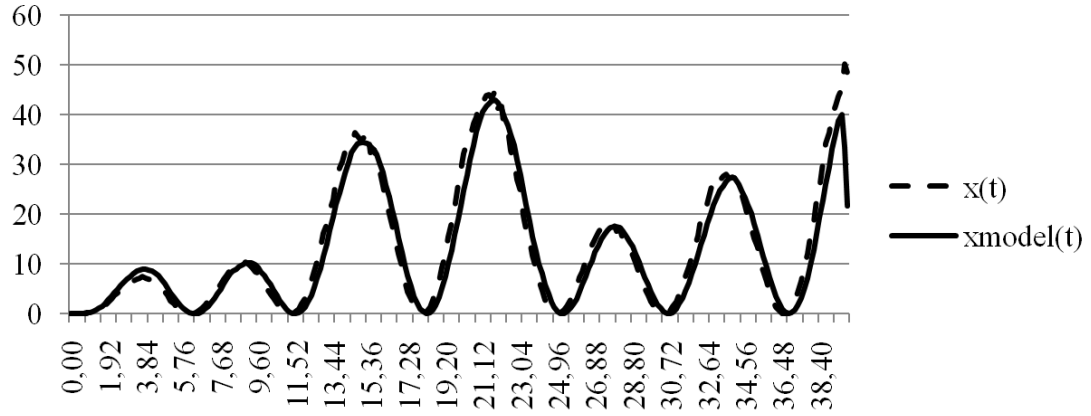


Рис. 6. Результат оценки выхода $x(t)$: $x$model(t) – модель нелинейной системы; x – выход системы; объем выборки s = 250, h = 0,16, помеха 5 %, ошибка моделирования 3,7 %

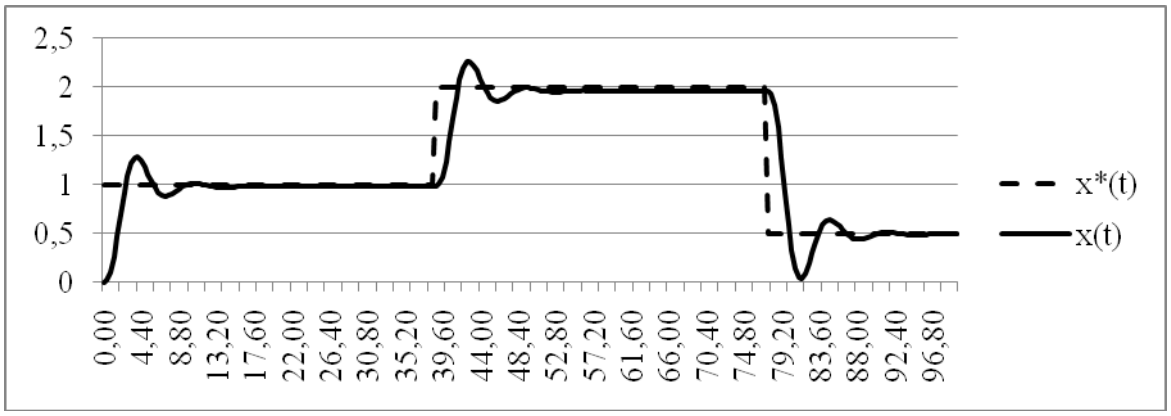


Рис. 7. Управление динамическим объектом: $x(t)$ – выход управляемого объекта; $x^*(t)$ – желаемое значение выхода, помеха 5 %, W = 0,15

Далее представлены реакции объекта, управляемого непараметрическим регулятором. Задающее воздействие принято в виде сложной ступенчатой функции:

$$x(t) = \begin{cases} 1, & t < tk/3, \\ 2, & tk/3 \le t < 2tk/3, \\ 0,5, & t \ge 2tk/3. \end{cases} \qquad (30)$$

Качество работы регулятора оценивается с использованием среднеквадратической ошибки управления (W) (рис. 7).

В результате экспериментов подтверждена работоспособность алгоритма построения непараметрического регулятора.

Заключение. Рассмотрена задача управления нелинейными динамическими системами, представленными в виде моделей Гаммерштейна. Исследуются системы, находящиеся в условиях частичной параметризации. В данном случае структура линейного динамического блока неизвестна, а вид нелинейности предполагается известным с точностью до параметров. В данном случае постановка задачи рассматривается в адаптивном варианте, тогда для создания регулятора требуется наличие модели исследуемого объекта.

Таким образом, задача управления нелинейной системой рассмотренного типа может быть разделена на два этапа. Сначала рассматривается непараметрическая идентификация исследуемого объекта. Суть метода построения модели тогда заключается в сочетании моделей линейного динамического и нелинейного статического процессов в общей модели системы. Данный метод не предусматривает наличия полной априорной информации о структуре объекта.

Далее приводится методика построения непараметрического регулятора посредством оценки оператора, обратного тому, который описывает исследуемый класс систем. Данные методы не предусматривают наличия полной априорной информации о структуре объекта. Описанные методы построения и исследования регуляторов позволяют управлять технологическими процессами и системами, имеющими нелинейную структуру.

Библиографические ссылки

1. Sung S. W., Lee J. Modeling and control of Wiener-type processes. Chemical Engineering Science. 2004. no. 59. P. 1515–1521.

2. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

3. Keesman K. J. System identification. An introduction. London : Springer, 2011. 351 p.

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

5. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 656 с.

6. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления М. : Мир, 1975. 681 с.

7. Медведев А. В. Непараметрические алгоритмы идентификации нелинейных динамических систем // Стохастические системы управления. Новосибирск : Наука. 1979. С. 15–22.

8. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). С. 4–9.

9. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилисси : Изд-во Тбилис. ун-та, 1983. 194 с.

10. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 173 с.

11. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – I // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 57–63.

12. Попков Ю. С. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем. М. : Энергия, 1976. 440 с.

13. Чайка С. Н. К идентификации динамических систем при частично параметризованной структуре модели // Динамика систем: Управление и оптимизация. Горький : Изд-во Горьковского гос. ун-та, 1989.

14. Коплярова Н. В., Сергеева Н. А. Непараметрические алгоритмы идентификации систем класса Винера и Гаммерштейна // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 2.1 (52). С. 133–137.

15. Коплярова Н. В., Сергеева Н. А. О непараметрических алгоритмах идентификации нелинейных динамических систем // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5(51). С. 39–44.

References

1. Sung S. W., Lee J. Modeling and control of Wiener-type processes. *Chemical Engineering Science*, 2004, no. 59, p. 1515–1521.

2. *Dorf R. C., Bishop R. H. Sovremennye sistemy upravleniya.* [Modern Control Systems]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy Publ., 2002, 832 p.

3. Keesman K. J. System identification. An introduction. London, Springer, 2011, 351 p.

4. Cypkin Ja. Z. *Osnovy informatsionnoi teorii identifikatsii* [Fundamentals of the informational theory of identification]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p.

5. Pupkov K. A., Egupov N. D. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. T1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem upravleniya* [Methods of classical and modern control theory. T1: Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of control systems]. Moscow, MGTU name. N.E. Baumana Publ., 2004, 656 p.

6. Eykhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [Identity-based control systems]. Moscow, Mir Publ, 1975, 681 p.

7. Medvedev A. V. [Nonparametric algorithms of nonlinear dynamical system identification]. *Stokhasticheskie sistemy upravleniya* [Stochastic control systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, p. 15–22 (In Russ.).

8. Medvedev A. V. [Nonparametric systems theory. Modeling]. *Vestnic SibGAU*, 2010, no. 4(30), p. 4–9 (In Russ.).

9. Nadaraya E. A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroyatnostei i krivoi regressii* [Nonparametric estimation of probability density function and regression curve]. Tbilissi, Tbilissi Univ. Publ, 1983, 194 p.

10. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 173 p.

11. Medvedev A. V. [Nonparametric systems theory. Control]. *Vestnic SibGAU*, 2013, no. 2(48), p. 57–63 (In Russ.).

12. Popkov U. S. *Identifikatsiya i optimizatsiya nelineinykh stokhasticheskikh sistem* [Identification and optimization of nonlinear stochastic systems]. Moscow, Energya Publ., 1976, 440 p.

13. Chaika S. N. [To dynamical systems of Hammerstein class identification with partially parameterized model structure]. *Dinamika sistem: upravlenie i optimizatsiya* [System dynamics: Control and optimization]. Gorki, Gorki university Publ, 1989, p. 24–36 (In Russ.).

14. Koplyarova N. V., Sergeeva N. A. [Nonparametric algorithms for system identification of Wiener and Hammerstein class]. *Sistemy upravleniya i informatsionnie tekhnologii*, 2013, no. 2.1 (52), p. 133–137 (In Russ.).

15. Koplyarova N. V., Sergeeva N. A. [About the nonparametric algorithms of nonlinear dynamical processes identification]. *Vestnic SibGAU*, 2012, no. 5(51), p. 39–44 (In Russ.).

© Коплярова Н. В., Медведев А. В., 2015

УДК 62.501

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 72–78

ОБ АДАПТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. А. Корнеева*, М. Е. Корнет, Н. А. Сергеева, Е. А. Чжан

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10
*E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru

Рассматривается задача идентификации и управления последовательными объектами в условиях неполной информации. Среди последовательно соединенных объектов могут быть объекты как динамические, так и безынерционные с запаздыванием. Подобного рода технологические цепочки часто имеют место в аэрокосмической отрасли. Они возникают при изготовлении ракетной техники, изделий электронной техники и др. Проблема комплексного управления группой технологических объектов, безусловно, относится к разряду актуальных. Отсюда возникает целый комплекс задач идентификации и управления, обусловленных тем, что априорная информация о них может быть различной. Ниже рассматриваются случаи, когда априорная информация об объектах имеет как параметрический, так и непараметрический характер.

Исследуется задача идентификации в условиях непараметрической или частично непараметрической неопределенности. В случае, если априорной информации недостаточно для исходной постановки задач, то естественно использовать теорию адаптивных обучающихся систем. Основная цель работы состоит в том, чтобы дать алгоритмическую основу для моделирования и управления производственным процессом в рамках технологического регламента. Сначала рассматривается задача идентификации и управления для локального объекта, а уже затем задача управления группой подобных объектов. В зависимости от конкретной задачи и уровня априорной информации конструируются соответствующие алгоритмы моделирования и управления, основанные как на достаточно хорошо разработанной параметрической теории адаптивных систем, так и непараметрической. В основе теории непараметрических систем лежат методы локальной аппроксимации, в частности алгоритмы непараметрического оценивания различного рода зависимостей по результатам наблюдения входных-выходных переменных объекта. Приведены конкретные непараметрические модели безынерционных объектов с запаздыванием и соответствующие непараметрические алгоритмы управления. Управляющие устройства в данном случае являются устройствами с памятью, что позволяет считать непараметрические алгоритмы управления с активным накоплением информации алгоритмами дуального управления.

Ключевые слова: идентификация, управление, дискретно-непрерывный процесс, адаптивные алгоритмы, непараметрические модели, непараметрическое дуальное управление.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 72–78

ABOUT ADAPTIVE CONTROL OF SEQUENCE OF TECHNOLOGICAL OBJECTS

A. A. Korneeva*, M. E. Kornet, N. A. Sergeeva, E. A. Chzhan

Siberian Federal University
79/10, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
*E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru

We consider the problem of identification and control of a sequence of objects in conditions of incomplete information. Among the series-connected objects there may be objects both dynamic and inertialess with delay. This kind of process chains often takes place in the aerospace industry. They arise in the manufacture of rocket technology, electronic products, etc. The problem of integrated management of technological process group certainly belongs to the category of topical. This raises a whole range of problems of identification and control due to the fact that a priori information about them can be different. Below we consider the cases when the a priori information about the object has both parametric and non-parametric nature.

We study the problem of identification in non-parametric or part non-parametric uncertainty. If a priori information is not sufficient for the initial statement of objectives, it is natural to use the theory of adaptive learning systems. The main purpose of the following paper is to give an algorithmic framework for modeling and process control within the production schedules. First, we consider the problem of identification and control for a local object, and then the task of managing a group of similar objects. Depending on the particular problem and a priori information level the

corresponding modeling and control algorithms are designed. These algorithms are based on enough developed parametric and nonparametric theory of adaptive system. The theory of non-parametric systems is based on local approximation method, in particular nonparametric estimation algorithms of various kinds of dependencies on the results of the input-output variables of the object. The paper presents the specific nonparametric model of inertialess objects with delay and corresponding nonparametric control algorithms with memory. Control devices in this case are devices with memory, which makes nonparametric control algorithms with active accumulation of information the dual control algorithms.

Keywords: identification, control, discrete-continuous process, adaptive algorithms, nonparametric models, nonparametric dual control.

Введение. Для различных отраслей промышленности типичными являются последовательная, параллельная или последовательно-параллельная схема производства. В некоторых случаях производственный процесс охвачен перекрестными связями, что часто приводит к нелинейным системам. Таким образом, речь идет не о каком-то локальном объекте (плавильная печь, энергоблок, обжиговая печь, измельчительный агрегат и т. д.), а о группе объектов. Подобные схема встречаются и в аэрокосмической области. Система группового управления объектом, естественно, соответствует более высокому уровню иерархии, чем система управления локальным объектом. Конечно же, важным, как и вообще в теории идентификации и управления, является объем априорной информации о различных каналах объектов. Не менее важными являются также и средства контроля соответствующих объектов. В зависимости от этого даются и соответствующие математические постановки задач идентификации и управления, которые для различных разрезов технологического процесса могут оказаться существенно отличающимися. В дальнейшем делается акцент на формулировке вышеназванных задач в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. В первом случае, как известно [1], необходимо представление модели объекта с точностью до вектора параметров с дальнейшей их оценкой по мере поступления текущей информации. Во втором случае можно ограничиться лишь качественными свойствами исследуемого процесса с последующей оценкой оператора объекта (чаще всего интегральных) по результатам выборки наблюдений [2].

Постановка задачи. Рассмотрим схему технологического процесса (рис. 1), которая достаточно часто встречается на практике, где приняты следующие обозначения: O_i, $i=\overline{1,N}$, – технологические объекты; $x = (x_1, x_2,..., x_N)$ – это характеристики, определяющие состав исходного продукта x_1 и полуфабрикатов $x_2, \ldots, x_N$, поступающих на вход технологических объектов; $\mu = (\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_N)$ – всевозможные добавки, поступающие на входы объектов; $u = (u_1, u_2, ..., u_N)$ – управляющие воздействия, $\xi = (\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_N)$ – внешние помехи, действующие на объекты технологической цепочки. Как видно из рис. 1, технологический процесс представляет собой последовательность локальных объектов.

Последний объект технологической цепочки O_N имеет две выходные переменные. Первая из них y – это параметр, характеризующий качество готового продукта (изделия). Особенностью здесь является то, что параметр y измеряется через значительные промежутки времени и поэтому не может быть использован при управлении процессом. Выходная переменная x_{N+1} – это переменная, косвенно характеризующая готовый продукт, но контролируемая через значительно меньший промежуток времени по сравнению с переменной y. В этом случае управление процессом осуществляется исходя из результатов измерений переменной x_{N+1}.

В общем случае все описанные переменные представляют собой векторы. Для простоты рассмотрим скалярный случай. Характеристики выходных переменных x могут быть представлены в виде следующей зависимости:

$$x_{i+1}(t) = f(x_i(t-\tau), u_i(t-\tau), \mu_i(t-\tau), \xi_i(t-\tau)), i=\overline{1,N-1}, \quad (1)$$

где τ – запаздывание, которое по разным каналам связи может отличаться, но из соображений простоты в тексте мы приняли единое обозначение запаздывания τ.

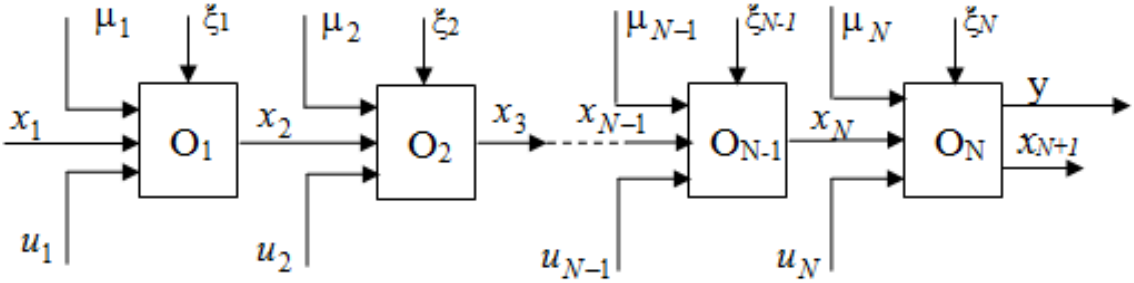


Рис. 1. Общая схема технологического процесса

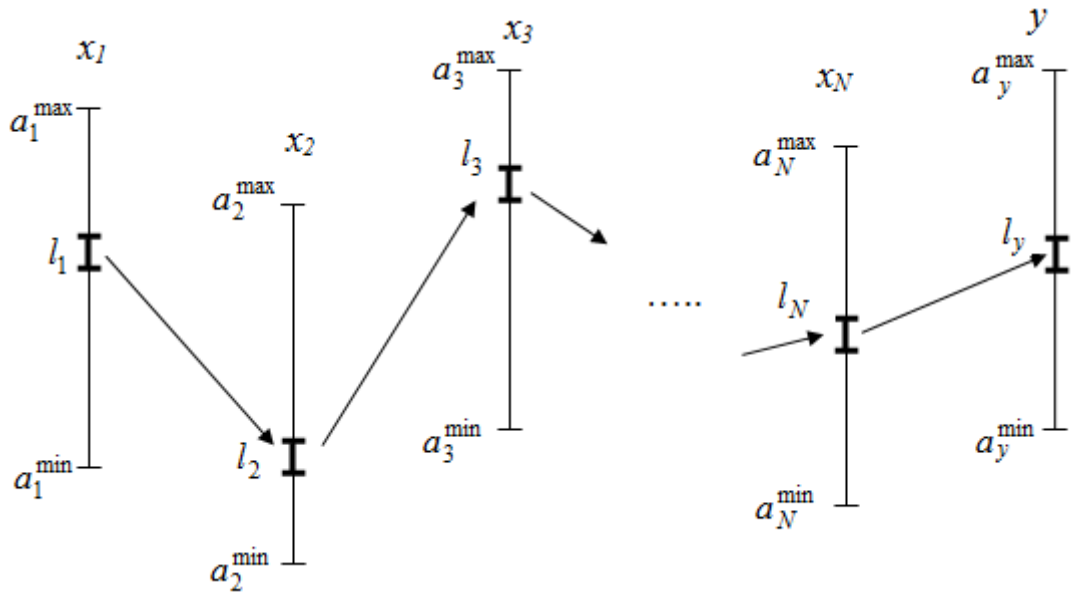


Рис. 2. Диапазоны значений переменных процесса, определяемые технологическим регламентом

Для всякого технологического процесса на производстве установлен технологический регламент, который определяет, в каком диапазоне значений должна находиться величина той или иной переменной процесса. Если значение данного параметра оказывается за пределами этого диапазона, то такое положение классифицируется как брак.

Для многих производств характерен довольно широкий диапазон изменения значений технологических переменных [3]. Как следствие этого, часто имеет место факт получения брака при соблюдении технологического регламента.

Рассмотрим следующую схему (рис. 2). На рис. 2 приняты обозначения: x_i, $i=\overline{1,N}$, – входные и промежуточные переменные процесса; a_i^{min}, a_i^{max}, $i=\overline{1,N}$, – минимальная и максимальная границы диапазона допустимых значений переменных, определяемые технологическим регламентом; l_i, $i=\overline{1,N}$, – желаемая область значения переменных; y – выходная переменная всего технологического процесса, определяющая качество готового продукта; a_y^{min}, a_y^{max} – границы допустимых значений переменной y, определяемые технологическим регламентом; l_y – требуемая область значения y.

Пусть параметр x_1 (например, температура) принял определенное значение из области $l_1 \in [a_1^{min}; a_1^{max}]$. Это значение может задаваться исходя, например, из качества продукта, поступившего на обработку. Заметим, что область l_1 много меньше всего интервала $[a_1^{min}; a_1^{max}]$. При этом параметр x_2 (к примеру, давление), статистически зависимый от показателя x_1, также принимает определенное значение из области $l_2 \in [a_2^{min}; a_2^{max}]$. Подобная ситуация происходит и для всех остальных переменных x_i, $i=\overline{1,N}$, соответствующих своему локальному объекту, а также для переменной процесса y.

На основании этого можно заключить, что для рационального ведения процесса необходимо для каждого показателя x_i определить область $l_i \in [a_i^{min}; a_i^{max}]$ исходя из значений x_{i-1}, где $i=\overline{2,N}$. Область значения показателей x определяется границами технологического регламента. Представляется целесообразным осуществлять технологический процесс в соответствии со следующей схемой: если на i-м переделе получены значения переменных, принадлежащих интервалу l_i, то на (i + 1)-м переделе наиболее целесообразно, чтобы соответствующие технологические переменные принадлежали не всему интервалу $[a_{i+1}^{min}; a_{i+1}^{max}]$, а его подобласти $l_{i+1} \in [a_{i+1}^{min}; a_{i+1}^{max}]$.

Для различных современных производств характерно, что диапазон значений технологических переменных достаточно широк во всех сечениях технологического процесса, хотя и соответствует технологическому регламенту. Поэтому возникает очень непростая задача, связанная с оптимизацией технологического процесса в рамках технологического регламента. Такой характер работы компьютерной системы управления технологическим процессом приведет к уменьшению диапазонов значений параметров на каждом переделе, что, конечно же, повысит качество выпускаемой продукции и позволит избежать ситуаций, связанных с браком.

Изложенная ситуация типична для многих, если не сказать для большинства, наших производств. Здесь возможны два пути, описанные в [3]: «Первый из них состоит в том, чтобы разработать на основе исследований, проведенных для каждого конкретного предприятия, более жесткий технологический регламент

и, естественно, ему следовать… Второй путь состоит в том, чтобы следовать имеющемуся технологическому регламенту, но оптимизировать режим ведения процесса в данном технологическом объекте с учетом фактически проведенной технологической операции на предыдущем объекте».

На промышленных предприятиях во многих случаях имеет место значительная «пестрота» ведения технологического процесса, поэтому первый путь представляется менее эффективным. Реализовать жесткий технологический регламент возможно только на предприятиях с достаточно высоким уровнем культуры производства, а это, прежде всего, определяется качеством технологического оборудования, средством локальной автоматики, квалификацией работающих и их отношением к делу.

Второй путь значительно более реалистичен, поскольку не требует капитальных затрат на реконструкцию, с одной стороны, а с другой – позволяет существенно повысить качество выпускаемой продукции и уменьшить потери при производстве тех или иных изделий. Для этого необходима разработка и внедрение интеллектуальных компьютерных систем оптимизации технологических режимов внутри технологического регламента. Подобные компьютерные системы оказываются, как правило, экономически эффективными.

Идентификация и управление объектами технологической цепочки. В зависимости от уровня априорной информации об объекте исследования выделяют методы идентификации в «узком» и «широком» смысле [4], иначе говоря, методы параметрической [1] и непараметрической [5] идентификации. Более подробно мы говорили об этом в [6–8].

Методы параметрической идентификации предполагают значительный объем априорных сведений об исследуемом объекте, позволяющий обоснованно выбрать структуру параметрической модели и, соответственно, построить ее. Например, для технологического объекта O_2 параметрическую модель можно записать следующим образом:

$$\hat{x}_2^{\alpha} = A_1^{\alpha}\left(x_1, u_1, \mu_1, \alpha_1\right), \qquad (2)$$

где A_1^{α} – параметрическая структура для локального объекта O_2; α_1 – вектор параметров. Структура A определяется для каждого локального объекта индивидуально. Модель (2) в общем случае можно переписать для произвольного объекта $O_{(i+1)}$ в виде

$$\hat{x}_{i+1}^{\alpha} = A_i^{\alpha}\left(x_i, u_i, \mu_i, \alpha\right), \; i = \overline{1, N-1}. \qquad (3)$$

В условиях недостатка априорной информации целесообразно использовать методы непараметрической идентификации. В этом случае непараметрическая модель локального объекта O_2 будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{x}_2^s = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_2 \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right)\Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right)\Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}, \qquad (4)$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция; c_s – коэффициент размытости ядра, соответствующий каждой переменной объекта; s – объем выборки наблюдений. Ядерная функция и коэффициент размытости ядра удовлетворяют некоторым условиям сходимости [9].

В общем виде модель (4) можно переписать в виде

$$\hat{x}_{j+1}^s = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_j \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right)\Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right)\Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}, \qquad (5)$$

$$j = \overline{N-1}.$$

Как было сказано ранее, мы можем обладать различными объемами априорной информации о каждом локальном объекте технологической цепочки. В одних случаях этого объема будет достаточно для построения параметрической модели типа (3). В других случаях необходимо применять методы идентификации в «широком» смысле (5). Таким образом, система моделей, описывающая поведение всего технологического процесса, будет представлять собой синтез параметрических и непараметрических алгоритмов.

Для управления последовательным технологическим процессом на практике достаточно часто применяют схему управления, представленную на рис. 3, где O – локальные технологические объекты; P – регуляторы; $x_i^*, i = \overline{1, N+1},$ – задающие воздействия, определяемые оператором. Следует заметить, что некоторые компоненты вектора y, в сущности, являются настолько важными, что определяют стоимость полученного продукта при его реализации. Как видно из приведенной схемы, управление не ведется по выходной переменной y, что связано с длительным временем ее измерения.

Недостатком подобной схемы является трудность определения задающих воздействий. На практике чаще всего они достаточно редко меняются, и это изменение находится в полном ведении оператора, который осуществляет эту операцию исходя из имеющегося опыта, конечно же, соблюдая технологический регламент.

Постановка задачи управления во многом зависит от уровня имеющейся априорной информации [10]. Большой интерес представляет развивающаяся на сегодняшний день теория адаптивных и обучающихся систем. Такие системы позволяют осуществлять оптимальное управление сложными объектами в условиях малой априорной информации за счет использования текущей информации, получаемой в результате функционирования объекта управления. Существенный интерес представляет развитие теории дуального управления в условиях малой априорной информации, при которой управляющие воздействия используются не только для приведения объекта к желаемому состоянию, но и для его изучения.

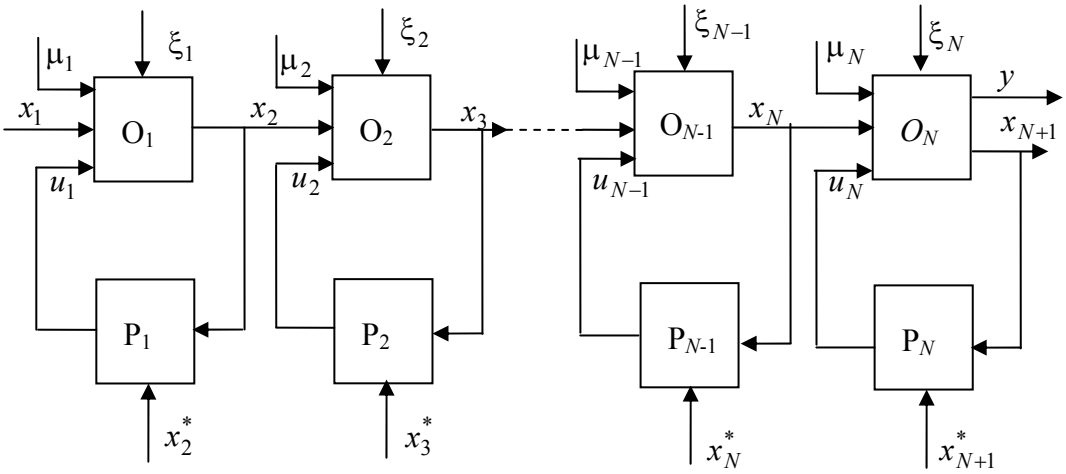


Рис. 3. Существующая схема управления последовательным технологическим процессом

Свое начало теория дуального управления берет от работ А. А. Фельдбаума [11]. В этих работах рассматривался случай байесового уровня априорной информации об объекте исследования, когда параметрическая модель объекта исследования известна с точностью до параметров, также известны плотности распределения внешних воздействий и параметров управляемого объекта. Такой уровень априорной информации на практике не встречается.

В дальнейшем эта теория была развита Я. З. Цыпкиным для условий параметрической неопределенности [1]. Здесь априорные требования к плотности вероятности случайных факторов ослабевают, но требуются знания о параметрической структуре объекта исследования. Параметризация структуры исследуемого объекта требует, тем не менее, значительного объема априорной информации, которого зачастую недостаточно. Неточность при выборе параметрической модели объекта может привести к тому, что адаптивная система утрачивает свои свойства и перестает быть в достаточной степени обучающейся.

В условиях малой априорной информации целесообразно использовать методы непараметрической теории адаптивных систем [12; 13]. Ее отличие от существующей параметрической теории адаптивных систем состоит в отсутствии этапа выбора параметрической структуры модели на основании имеющейся априорной информации. В этом случае требования к априорной информации ослабевают. Здесь требуется информация на качественном уровне (статический или динамический объект, линейный или нелинейный и др.).

Рассмотрим непараметрический алгоритм дуального управления для отдельно взятого локального объекта описанной технологической цепочки, например, для объекта O_2. Управляющее воздействие в этом случае формируется по следующему закону:

$$u_{s+1}^2 = u_{s+1}^{2*} + \Delta u_{s+1}^2, \tag{6}$$

где u_{s+1}^{2*} представляет собой компоненту, отвечающую за обучение алгоритма; Δu_{s+1}^2 – «поисковый» шаг. Дуализм данного алгоритма состоит в том, что компонента u_{s+1}^{2*} содержит в себе «знания» об объекте, а компонента Δu_{s+1}^2 – изучающие «поисковые» шаги [14]. В общем случае формулу (6) можно записать как [15]

$$u_{s+1}^i = u_s^{i*} + \Delta u_{s+1}^i,\ i = \overline{1, N}\ . \tag{7}$$

Компонента u_s^{2*} находится с использованием непараметрической оценки функции регрессии по наблюдениям и имеет следующий вид (для объекта O_2):

$$u_s^{(2)*} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_1^i \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(3)*} - x_i^{(3)}}{c_s^{x_3}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(2)} - \mu_i^{(2)}}{c_s^{\mu_2}}\right)\times}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(3)*} - x_i^{(3)}}{c_s^{x_3}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(2)} - \mu_i^{(2)}}{c_s^{\mu_2}}\right)\times} \frac{\times\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(2)} - x_i^{(2)}}{c_s^{x_2}}\right)}{\times\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(2)} - x_i^{(2)}}{c_s^{x_2}}\right)}, \tag{8}$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция; c_s – соответствующие коэффициенты размытости ядра. И ядерная функция, и коэффициенты размытости ядра удовлетворяют некоторым условиям [9]. В общем случае формула (8) имеет вид

$$u_s^{(i)*} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_1^i \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j+1)*} - x_i^{(j+1)}}{c_s^{x_{j+1}}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(j)} - \mu_i^{(j)}}{c_s^{\mu_j}}\right)\times}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j+1)*} - x_i^{(j+1)}}{c_s^{x_{j+1}}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(j)} - \mu_i^{(j)}}{c_s^{\mu_j}}\right)\times} \frac{\times\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j)} - x_i^{(j)}}{c_s^{x_j}}\right)}{\times\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j)} - x_i^{(j)}}{c_s^{x_j}}\right)}, \quad j = \overline{1, N}. \tag{9}$$

Второе слагаемое в формуле (6) Δu_{s+1}^2 – «поисковый» шаг, который рассчитывается следующим образом:

$$\Delta u_{s+1}^2 = \gamma(x_{s+1}^{(3)*} - x_s^3), \qquad (10)$$

где γ – некоторый коэффициент.

В более общем виде формулу (10) можно записать следующим образом:

$$\Delta u_{s+1}^i = \gamma(x_{s+1}^{(i+1)*} - x_s^{i+1}),\ i = \overline{1, N}. \qquad (11)$$

Результаты исследования данного непараметрического алгоритма дуального управления были приведены в [12–14].

Заключение. Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что в статье рассматриваются задачи идентификации и управления технологическим процессом, который представляет собой цепочку локальных объектов. Подобный характер технологических процессов является типичным не только для аэрокосмической отрасли, но и также имеет место в металлургии, энергетике, нефтепереработке и т. д.

Поставлена задача управления внутри технологического регламента. Приведена некоторая алгоритмическая основа построения моделей и алгоритмов управления локальными объектами в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. Последнее приближает основные результаты статьи к практической разработке реальных компьютерных систем управления технологическими процессами.

Благодарности. Выражаем искреннюю благодарность научному руководителю профессору А. В. Медведеву за помощь в проведении исследований.

Acknowledgement. We express our sincere gratitude to our scientific supervisor, Prof. A. V. Medvedev, for research assistance.

Библиографические ссылки

1. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.

2. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 173 с.

3. Медведев А. В. Информатизация управления : учеб. пособие / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1995. 80 с.

4. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 681 с.

5. Кошкин Г. М., Пивен И. Г. Непараметрическая идентификация стохастических объектов. Хабаровск : РАН. Дальневосточное отделение, 2009. 336 с.

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

7. Корнеева А. А., Сергеева Н. А., Чжан Е. А. О непараметрическом анализе данных в задаче идентификации // Управление, вычислительная техника и информатика : Вестник Томского государственного университета. 2013. Вып. 1 (22). С. 86–96.

8. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. About data analysis in nonparametric identification problem // Computer data analysis and modeling. Theoretical and applied stochastics : Proceedings of the tenth Intern. Conf. 2013. Vol. 2. P. 56–60.

9. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбилис. ун-та, 1983. 194 с.

10. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 656 с.

11. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.

12. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – I // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 57–63.

13. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – II // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 85–90.

14. Корнеева А. А., Медведев А. В. Непараметрическое дуальное управление безынерционными системами // Кибернетика и высокие технологии XXI века : Тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2013. С. 250–261.

15. Корнеева А. А. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки // Известия вузов. Черная металлургия. Вып. 10. 2013. С. 24–28.

References

1. Tsypkin Ja. Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.

2. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 174 p.

3. Medvedev A. V. *Informatizatsiya upravleniya: uchebnoe posobie* [Informatization management: a tutorial]. Krasnoyarsk, SAA Publ., 1995, 80 p.

4. Eykhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [Identity-based control systems]. Moscow, Mir Publ., 1975, 681 p.

5. Koshkin G. M, Piven I. G. *Neparametricheskaya identifikatsiya stokhasticheskikh ob''ektov*. [Nonparametric identification of stochastic objects]. Khabarovsk, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 2009, 336 p.

6. Korneeva A. A., Chzhan E. A. [About nonparametric modeling of stochastic objects]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2 (48), p. 37–42 (In Russ.).

7. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. [About nonparametric data analysis in the identification problem]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitelnaya tekhnika i informatika*. 2013, vol. 22, no. 1, p. 86–96 (In Russ.).

8. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. About data analysis in nonparametric identification problem. *Proceedings of the tenth international conference "Computer data analysis and modeling. Theoretical and applied stochastics"*. 2013, vol. 2, p. 56–60.

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

10. Pupkova K. A., Yegupov N. D. *Methods of classical and modern control theory. T1: Mathematical models of dynamic characteristics and analysis of control systems* [Metody klassicheskoy and sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki and analiz sistem upravleniya]. Moscow, MGTY im. N. E. Baumana Publ., 2004, 656 p.

11. Fel'dbaum A. A. *Osnovi teorii optimal'nikh avtomaticheskih sistem* [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.

12. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. Control-I]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2(48), p. 57–63 (In Russ.).

13. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. Control-II]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 3(49), p. 85–90 (In Russ.).

14. Korneeva A. A., Medvedev A. V. [Nonparametric dual control of inertialess systems]. *Kibernetika i vysokie tekhnologii XXI veka: trudy XIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Cybernetics and High Technologies of XXI Century: Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Voronezh, 2013, p. 250–261 (In Russ.).

15. Korneeva A. A. [Nonparametric modeling of converter melting]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2013, vol. 10, p. 24–28.

© Корнеева А. А., Корнет М. Е.,
Сергеева Н. А., Чжан Е. А., 2015

UDC 519.6

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 79–85

ABOUT THE EFFECTIVENESS OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR MULTICRITERIAL DESIGN OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

A. A. Koromyslova*, M. E. Semenkina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
*E-mail: akoromyslova@mail.ru

Artificial neural networks can be widely used in various fields: economics, medicine, space grown, etc. However, using neural networks to solve a particular problem arises the problem of choosing an effective structure of neural networks. Solving these problems is an important step in the application of neural network technology to practical problems, since these stages directly affects the quality (value) of the resulting neural network model. However, this takes more time and material resources, which leads to the need to automate the process. For this purpose the use of multicriteria evolutionary algorithms, such as SPEA, SPEA2 and NSGAII is offered as they can solve two problems at once. Firstly, they can generate a neural network, thus saving computational resources. And secondly, they can solve tasks quite efficiently.

Modified evolutionary algorithms that produce selection of the most informative features, do not improve performance of algorithms that use all the inputs on the problems of small dimension, but significantly improve the accuracy, increasing dimension.

The modified algorithms together with automatic design structure of artificial neural networks determine the most informative features, and include as inputs only weakly correlated with each other variables of the original problem.

Keywords: artificial neural networks design, evolutionary algorithms, multicriteria optimization, most informative features, classification.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 79–85

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. А. Коромыслова*, М. Е. Семенкина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: akoromyslova@mail.ru

Искусственные нейронные сети могут быть широко использованы в различных областях: экономике, медицине, космической отрасли и т. п. Однако при использовании нейронных сетей для решения конкретной задачи возникает проблема выбора эффективной структуры нейронной сети. Решение этих проблем является важным этапом применения нейросетевых технологий для практических задач, так как от этих этапов напрямую зависит качество (адекватность) полученной нейросетевой модели. Однако это требует больших затрат временных и материальных ресурсов, что приводит к необходимости автоматизировать процесс. Для этого предлагается использовать многокритериальные эволюционные алгоритмы, такие как SPEA, SPEA2 и NSGAII, так как они могут решать сразу две проблемы: во-первых, генерировать небольшие нейронные сети, тем самым экономя вычислительные ресурсы, а во-вторых, решать поставленные задачи достаточно качественно.

Модифицированные эволюционные алгоритмы, которые производят отбор наиболее информативных признаков, не улучшают работу алгоритмов, использующих все входы на задачах малой размерности, но значительно повышают точность при росте размерности.

Модифицированные алгоритмы одновременно с автоматическим проектированием структуры искусственных нейронных сетей определяют наиболее информативные признаки, причем включают в качестве входов только слабо коррелированные друг с другом переменные исходной задачи.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, эволюционные алгоритмы, многокритериальная оптимизация, наиболее информативные признаки, классификация.

Introduction. The intensity of the use of intelligent information technologies (IIT) [1] is increasing in all areas of human activity. This is not only due to increasing computing power, which can be used to solve challenging real-world problems, but also due to the ability of systems, based on the use of IIT, to deal effectively with a wide range of tasks: pattern recognition, classification, function approximation, prediction and control [2].

Usually, the implementation of IIT is a time-consuming and complex process. If a researcher decides to use artificial neural networks (ANN) [3] to solve a real world problem, he/she will face the problem of choosing the ANN structure. In contrast to the tuning of weighting coefficients, this issue is not so widely discussed in scientific papers.

In real world problems the dimension can be high, so there is a need to implement the pre-processing of data to reduce the amount of computation effort. An automated choice of the most informative features allows the researcher to keep the performance at an acceptable level using fewer resources.

Since in the design of artificial neural networks it is often difficult to find a compromise between accuracy and the simplicity of the solution obtained by the networks, researchers are encouraged to use evolutionary algorithms of multicriteria optimization, such as Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGAII) [4], Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) [5], Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2) [5]. The effectiveness of these techniques is studied in this paper.

1. Evolutionary Algorithms for Optimization

Genetic algorithm for unconditional one-criterion optimization. Genetic algorithms (GA) belong to the class of adaptive stochastic optimization algorithms [6].
For solving optimization problems a GA allocates a fixed amount of resources determined by the number of individuals in a population and the number of generations. The evaluation of GA effectiveness was fulfilled for different combinations of genetic operators. The identifying of the best settings was carried out by comparing indicators such as the reliability of the algorithm and the average number of generations (iterations), for which a solution was found with a specified accuracy. The reliability is the proportion of GA successful runs. The algorithm with the highest reliability was considered as the best one. Combinations of settings with the same reliability were compared with the second indicator: the smaller the average number of iterations is, the more effective is the algorithm. The required accuracy is equal to 0.01. The results obtained were averaged over 100 runs. The reliability values averaged over all tasks as well as their variations are given in tab. 1. The last column shows the average generation numbers when solutions were found and the scatter throughout all tasks. The effectiveness of the algorithm was verified on an international set of test problems [7].

Table 1

The results of GA for test problems of unconditional optimization

	Reliability	Generations
The best settings GA	0,937 [0.471; 1]	21.7 [15; 32]
Medium setting GA	0.722 [0.214; 0.961]	14.2 [12; 45]
The worst setting GA	0.55 [0.147; 0.92]	52.9 [14; 69]

Analysis of results showed that usually proportional selection, two-point crossover and average mutation are the best settings. Sometimes the best algorithm includes the one-point crossover. The algorithm with tournament selection (tournament size is equal to 3), one-point crossover and low mutation is the worst one.

Evolutionary algorithms for unconditional multicriteria optimization. In its most general form, solving the problem of multicriteria optimization requires the finding of an optimal set of K criteria. Non-dominated points in the domain are called the Pareto set, and their image in the space of criteria is the Pareto front. Usually in multicriteria optimization problems it is sufficient to choose a solution from the Pareto set; these points cannot be preferred to one another but are better than any others. So after the formation of the Pareto set representative approximation the task is considered to be solved [8].

There are many variants of evolutionary algorithms, which can be used for solving multicriteria optimization problems. This paper discusses the Non-dominated sorting Genetic Algorithm II (NSGAII) [4], Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) and Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2) [5].

The efficiency of the algorithms was investigated on the international set of test multiciriteria optimization problems [9]. Summary results are presented in tab. 2, which shows the evaluation of the effectiveness of the multicriteria optimization algorithms. Algorithm settings are considered to be the “best” if the solutions found received more points in the Pareto front, as well as if the variation in the spaces of alternatives and criteria is maximized. Tab. 2 also shows estimations of the algorithms with settings that were the worst according to the above criteria and the result averaged over all settings.

The evaluation of the effectiveness of algorithms was performed using three metrics: percentage points in the external Pareto set (%), the scatter of points in the space of solutions of the exterior set (*X*), and the scatter of points in the space of external criteria set (*Y*). All these criteria should be maximized.

Table 2

The results of testing evolutionary algorithms for multicriteria optimization

		The best	Average	Worst
NSGAII	%	84	74	52
	X	0.97671259	0.947632	0.9093986
	Y	0.969613066	0.94658963	0.92338803
SPEA	%	93	70	54
	X	0.6079351	0.5958682	0.556933
	Y	0.719441	0.71654223	0.7102566
SPEA2	%	75	71	67
	X	0.7126218	0.5197434	0.309482
	Y	0.9603189	0.83283465	0.7125409

Analysis of the test results shows:

– SPEA 2 solves the problem better than SPEA in the sense of the second and third metrics;

– SPEA 2 spends more time on computations;

– NSGA II solves the problem better than SPEA and SPEA2: it gives minimal deviation from the Pareto set and a more uniform distribution of the obtained non-dominated solutions.

Thus, it was found that NSGA II with average mutation and uniform crossover is the most effective algorithm, i. e. the Pareto front includes the highest number of points from the external set, and also their variation in the spaces of alternatives and criteria is maximal.

2. Artificial Neural Networks

Genetic algorithm for adjusting of the ANN weight coefficients (GA-ANNW). The error back-propagation algorithm is one of the commonly used methods for training multilayer neural networks. This method has the following serious drawbacks:

– frequently converged into a local minimum;

– strong influence of the choice of the step size on the quality of the solution found.

In order to improve the accuracy of solutions it is possible to use a genetic algorithm for ANN training since it is effective for solving global optimization problems and could avoid the above-mentioned problems.

In this paper, the genetic algorithm was implemented to adjust the weight coefficients of fully connected multilayer feed-forward neural networks (GA-ANNW) [10]. We used the sigmoid as an activation function.

Weights are recorded sequentially in the chromosome as a binary code. An example of a chromosome is shown in fig. 1, where 4 bits correspond to one weight coefficient. In solving real problems, the number of bits that are used to encode a single weighting coefficient depends on the accuracy of the settings and the spread of possible values of weights.

The effectiveness of GA-ANNW was tested on 14 test approximation problems and was found to be sufficiently high [10].

Genetic algorithm for automated design of artificial neural networks structures (GA-ANNS). During the design of ANN structure, the number of layers and the neurons on each layer must be determined and also the activation function type for each neuron must be established. Experts can identify an optimal ANN structure, but it is a time-consuming procedure. We propose the use of a genetic algorithm to automatically design the ANN structure (GA-ANNS) [10].

GA-ANNS uses a binary chromosome, whose example is shown in fig. 2. The corresponding neural network is presented in fig. 3. Hidden layers are coded sequentially. Each neuron is encoded in four bits. For each neuron, we firstly, randomly, with a fixed probability equal to 0.3, decided whether it will be used in the network or not. If in the network a neuron is not presented, its place in the chromosome is marked with zeros. Otherwise, it is randomly selected as one of the fifteen activation functions [11], whose number is written in binary code.

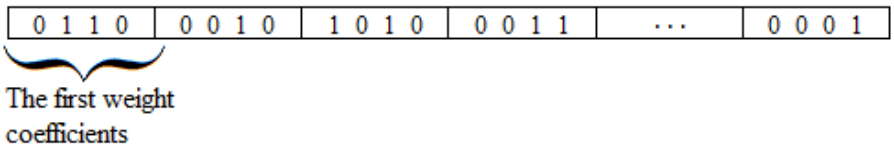


Fig. 1. Binary chromosome for ANN weight coefficients tuning

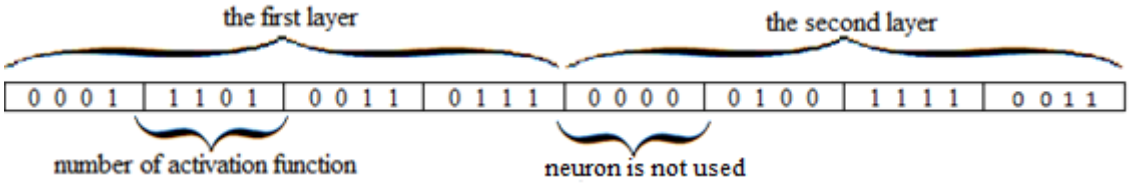


Fig. 2. Binary chromosome for GA-ANNS

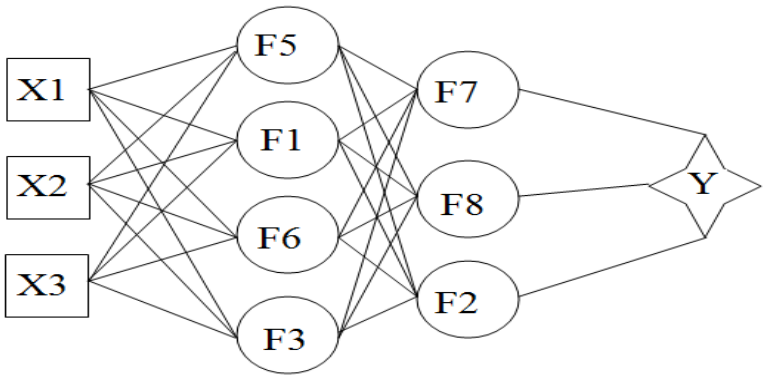


Fig. 3. Example of the ANN built using GA-ANNS

For each selected ANN structure GA-ANNW was run for the tuning of weighting coefficients.

Genetic algorithm with a choice of the most informative features (GA-ANNinput). Since the efficiency of the genetic algorithm for ANN depends on the dimension of the problem in hand, it is reasonable to avoid the use of uninformative features. The modification of the genetic algorithm for the choice of the most informative features during the automated design of ANN (GA-ANNinput) assumes the use of additional bits in the GA chromosomes. These bits determine whether an input is included in the input layer or not. The coding method can be seen in fig. 4, and the corresponding chromosomes for the neural network are shown in fig. 5.

Evolutionary algorithms for automated multicriteria design of ANN (MC-ANNinput) [12]**.** Solving the problem of the design of artificial neural networks, it is often difficult to find a compromise between the accuracy and simplicity of the solution. We propose to use evolutionary algorithms for this. We use an averaged modelling error, the ANN neuron number and the input number as criteria for MC-ANNinput. The encoding of the binary string follows the same rules as in the previous method.

3. Performance Estimation of Evolutionary Algorithms for Automated Neural Network Design

The proposed algorithms were tested with the follow rules:

– the performance for all genetic algorithm settings was estimated over 100 runs;

– the number of generations is equal to 1000;

– the number of individuals is equal to 500;

– the size of the training sample is equal to 70 % of the total number of examples, and the test sample size is equal to 30 %;

– results are presented for the best settings of the genetic algorithm;

– the maximum size of a network is equal to 5×5;

– error of all runs were averaged.

The effectiveness of the algorithms was estimated over 14 test problems of approximation from [7] and the results are presented in tab. 3.

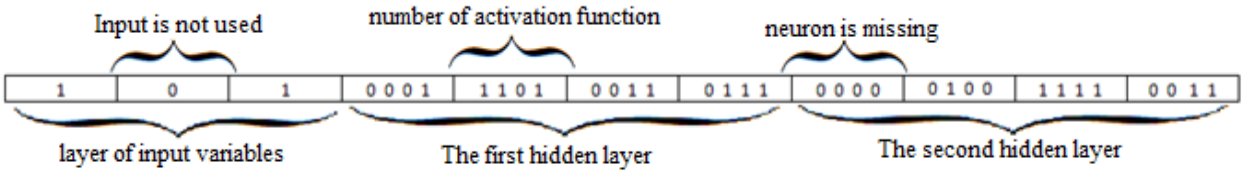


Fig. 4. Chromosome in GA-ANNinput

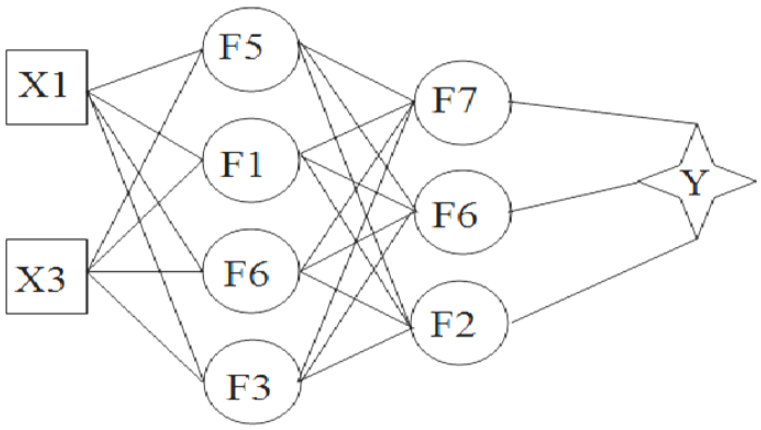


Fig. 5. Corresponding ANN

Table 3

Test results

Algorithm	Reliability	Generation	Average number of neurons
GA-ANNS	0.917 [0.315; 1]	15.7 [11; 29]	3.5
GA-ANNinput	0.896 [0.307; 1]	26.3 [31; 81]	3.4
GA-ANNW	0.543 [0.295; 0.987]	51.6 [42; 84]	25
MultiNSGAII-ANN	0.915 [0.279; 1]	19.9 [18; 48]	4
MultiSPEA2-ANN	0.874 [0.365; 0.953]	31.8 [34; 67]	4.7
MultiSPEA-ANN	0.832 [0.471; 0.921]	29.7 [38; 73]	6

The modification does not bring significant improvements, since the vector of input variables has a small dimension, so all inputs are informative. Therefore, it can be useful for tasks that are more complex.

The GA with proportional selection, two-point crossover and average mutation has achieved the highest accuracy. These settings should be used to solve real-world problems of data analysis.

4. Performance Estimation of Evolutionary Algorithms for Automated Neural Network Design on Real World Problems

Three real problems of data analysis [13] were used for the evaluation of the proposed algorithms: the Iris classification, Australian and German bank scoring problems. The parameters of these tasks (the number of inputs, the sample size, the number of classes and number of examples in each class) are shown in tab. 4. For solving these problems algorithms used 1500 generations and 750 individuals. All results were averaged over 100 runs.

The comparison of the implemented algorithms with other methods was performed for the Iris classification problem [14] and bank scoring problems [15]. The results for the Iris classification problem and for bank scoring problems are shown in tab. 5 and in tab. 6 correspondingly.

As it can be seen from tab. 5, GA-ANNinput did not improve performance in comparison with GA-ANNS. The main reason for this is the same as for test problems (all inputs are sufficiently informative).

It can be seen from tab. 6 that the GA-ANNinput shows higher efficiency than GA-ANNS and MultiNS-GAII-ANN. The modified algorithm takes second place among all the algorithms for the Australian problem, it loses only for the method specially developed for such tasks, and is in 6th place for the German problem. That is a good result for a non-specific for the problem method.

The algorithm uses such important data as a credit history or house ownership, but could reject less important data, like family status.

Fig. 6 and 7 show that the structures of the best neural networks are relatively simple. On average the developed algorithms used about 7 inputs (from 15) for the Australian credit problem and approximately 11 inputs (from 24) for the German credit problem and a network with 9 and 14 neurons, respectively, from the maximum possible 25 neurons.

Table 4

Numerical characteristics of the data analysis problems

Name of the task	Number of attributes	The sample size	Number of classes	Separation by class
Iris	4	150	3	Class 1: 50 Class 2: 50 Class 3: 50
Australian Credit Data	15	690	2	Class 1: 290 Class 2: 310
German Credit Data	24	1000	2	Class 1: 700 Class 2: 300

Table 5

The results for Iris classification problem

The method name	ES-ANN	CRO-ANN	EP-ANN	GSO-ANN	GA-ANNS	PSO-ANN	GA-ANN input	MGNN	Multi NSGA II-ANN
Error	0.0066	0.0067	0.0116	0.0142	0.0201	0.0202	0.0231	0.0305	0.0312

Table 6

Performance comparison (classification errors)

The method name	Australian Credit Approval	German Credit Data
2SGP	0.0863	0.1985
GA-ANNinput	0.087	0.232
GA-ANNS	0.091	0.241
C4.5	0.1014	0.2227
MLP	0.1014	0.2382
MultiNSGAII-ANN	0.102	0.24
Fuzzy classifier	0.109	0.206
GP	0.1111	0.2166
k-NN	0.1256	0.2849
LR	0.1304	0.2163
Bayesian approach	0.153	0.321
Bagging	0.153	0.316
Boosting	0.24	0.3
CART	0.285	0.2435

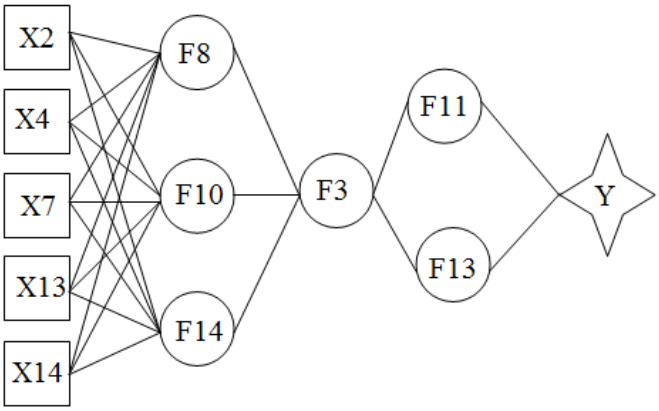


Fig. 6. The best found ANN for the Australian credit problem (GA-ANNinput)

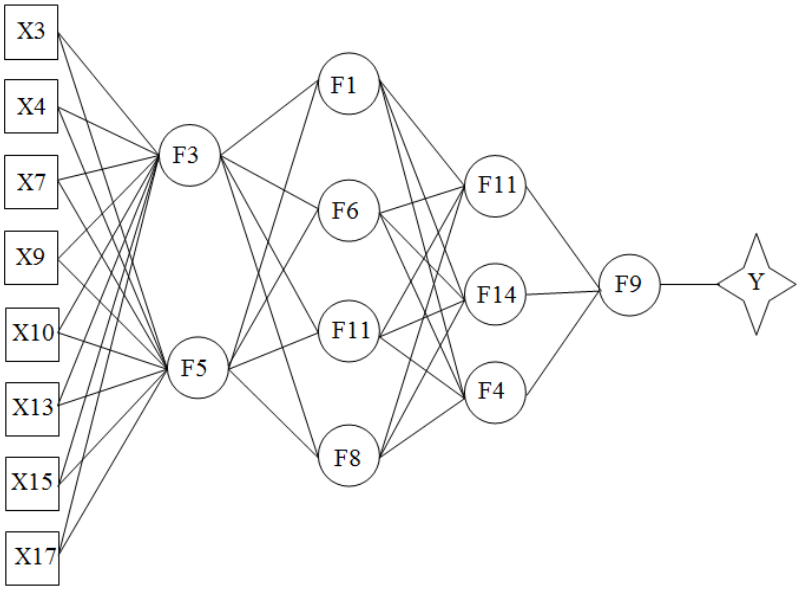


Fig. 7. The best found ANN for the German credit problem (GA-ANNinput)

For two bank scoring tasks statistical analysis of raw data was performed. It was found that these problems have a weak relationship between some input variables and output variables (class). Additionally, input attributes are divided into groups whose members are strongly correlated with each other and weakly correlated with members of other groups. Further analysis showed that the ANN obtained by the GA-ANNinput or MultiNSGA-ANN, as a rule:

– not used inputs that are weakly correlated with the output variable;

– select only significant inputs, one from each group and discard the rest.

At the same time, for problems in which all inputs are significant, GA-ANNinput typically includes input variables without losing information. We can conclude that the proposed tool, which allows not only the building of sufficiently effective neural network classifiers, but at the same time the establishment of the most significant features, is useful for further investigation.

Conclusion. In this paper, we tested a genetic algorithm for the tuning of weighting coefficients and ANN structure design for approximation problems. It is shown that neural networks with a structure that is configured by using a genetic algorithm solve the problem of approximation on a good level compared to the classical methods.

A modified genetic algorithm with ANN structure design with a selection of the most informative features was developed and implemented. The modified algorithm for test approximation problems did not produce a significant improvement in comparison with the genetic algorithm without feature selection. This is due to the fact that the test problems input variables vector has a small dimension, and consequently the exclusion of any input is impossible and leads to a decrease in the solution accuracy.

However, for solving large-scale problems, the modified algorithm has shown higher accuracy, and taken fewer computational resources. The modified algorithm with determination of the most informative features together with the automated design of neural network classifiers includes as the input only variables of the original problem that are weakly correlated with one another.

In the future, we plan to develop a genetic algorithm for automated design of fuzzy logic systems with the simultaneous selection of the most informative features.

Acknowledgment. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project 140/14.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, НИР 140/14.

References

1. Goldberg D. E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning.* 1989, Reading, MA: Addison-Wesley, 403 p.

2. Kruglov V., Borisov V. [Artificial neural networks]. *Teoriya i praktika.* Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2002, 382 p. (In Russ.).

3. Girosi F., Jones M., Poggio T. Regularization theory and neural network architecture. *Neural Computation*. 1995, vol. 7, p. 219–270.

4. Seshadri A. *NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm.* 2006, 524 p.

5. Wiley, J. & Sons. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. 2001, p. 497.

6. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. MI: University of Michigan Press, 1975.

7. Test problems unconditional one-criterion optimization. Available at: http://dces.essex.ac.uk/staff/qzhang/moeacompetition09.htm.

8. Luke S. Essentials of Metaheuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes. Zeroth Edition. 2009, Online Version 0.5.

9. Zhang Q., Zhou A., Zhao S., Suganthan P. N., Liu W., Tiwari S. Multiobjective optimization Test Instances for the CEC 2009 Special Session and Competition. *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2009)*. 2009, p. 30.

10. Koromyslova A. A., Semenkina M. E. [Evolutionary design of neural network classifiers with the selection of the most informative features]. *Materialy konferentsii "Teorija i praktika sistemnogo analiza"* [Proceedings of the conference "Theory and practice of system analysis"]. Part 2, p. 74–83 (In Russ.).

11. Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition).* 2009, 906 p.

12. Brester Ch. Yu., Semenkin E. S. Development of adaptive genetic algorithms for neural network models multicriteria design. *Vestnik SibSAU.* 2013, No. 4(50), p. 99–103.

13. Frank A., Asuncion A. UCI Machine Learning Repository. 2010. *Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science.* Available at: http://archive.ics.uci.edu/ml.

14. Yu J. J. Q., Lam A. Y. S., Li V. O. K.: Evolutionary Artificial Neural Network Based on Chemical Reaction Optimization. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011), 2011, pp. 2083–2090.

15. Sergienko R., Semenkin E., Bukhtoyarov V. Michigan and Pittsburgh Methods Combining for Fuzzy Classifier Generating with Coevolutionary Algorithm for Strategy Adaptation. *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011)*. 2011, p. 113–120.

Библиографические ссылки

1. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading, MA : Addison-Wesley, 1989. 403 p.

2. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети // Теория и практика. 2-е изд. М. : Горячая линия – Телеком. 2002. 382 с.

3. Girosi F., Jones M., Poggio T. Regularization theory and neural network architecture // Neural Computation. 1995. Vol. 7. Pp. 219–270.

4. Seshadri A. NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm. 2006. 524 p.

5. Wiley J. & Sons. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. 2001. Pp. 497.

6. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. MI : University of Michigan Press, 1975.

7. Test problems unconditional one-criterion optimization. URL: http://dces.essex.ac.uk/staff/qzhang/moeacompetition09.htm.

8. Luke S. Essentials of Metaheuristics // A Set of Undergraduate Lecture Notes / Zeroth Edition. Online Version 0.5. 2009.

9. Multiobjective optimization Test Instances for the CEC 2009 Special Session and Competition / Q. Zhang [et al.] // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2009). 2009. Pp. 30.

10. Коромыслова А. А., Семенкина М. Е. Эволюционное проектирование нейросетевых классификаторов с выбором наиболее информативных признаков // Теория и практика системного анализа : материалы конференции. Ч. 2. С. 74–83.

11. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. 3rd Edition. 2009. 906 p.

12. Brester Ch. Yu., Semenkin E. S. Development of adaptive genetic algorithms for neural network models multicriteria design // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 4 (50). С. 99–103.

13. Frank A., Asuncion A. UCI Machine Learning Repository. Irvine, CA : University of California, School of Information and Computer Science, 2010. URL: http://archive.ics.uci.edu/ml.

14. Yu J. J. Q., Lam A. Y. S., Li V. O. K.: Evolutionary Artificial Neural Network Based on Chemical Reaction Optimization. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011), 2011, p. 2083–2090.

15. Sergienko R., Semenkin E., Bukhtoyarov V. Michigan and Pittsburgh Methods Combining for Fuzzy Classifier Generating with Coevolutionary Algorithm for Strategy Adaptation // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011). 2011. P. 113–120.

© Koromyslova A. A., Semenkina M. E., 2015

УДК 621

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 86–90

ЗАВИСИМЫЕ ОТКАЗЫ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

П. А. Кузнецов

Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82
E-mail: forubox@yandex.ru

Рассматривается вопрос взаимовлияния элементов автоматизированной системы управления (АСУ). Изучается безопасность и живучесть. Приводится градация отказов. Освещаются последствия отказов элементов и модулей системы, вызывающих отказы других элементов и модулей, возможности предотвращения этих отказов. Приводятся варианты возможных зависимых отказов. Показывается, что возможным источником опасности могут быть как отказы модулей, так и отказы резервных элементов в этих модулях. Постулируется, что повышение числа резервных элементов как минимум, не понижает до нуля потенциальную опасность. Рассматриваются различные логические структуры соединения элементов в АСУ. Приводится типичная надежностная структура автоматизированной системы управления, выполняющей несколько функций, древовидная структура. Выводится, что одна система АСУ ТП выполняет несколько функций. Один КА зачастую исполняет несколько функций. Также у самой АСУ имеются функции, не влияющие на управление, и для определения надежности системы необходимо определять, какие элементы участвуют в выполнении каких функций. Необходимо определять последовательности элементов, выполняющие ту или иную функциональную задачу. Иллюстрируется процесс развития отказов в многофункциональных системах, взаимное влияние элементов в них в случае простой линейной и разветвленной резервированной структур. Рассматриваются негативные последствия применения резервирования. Приводится пример расчёта надёжности системы с параллельным соединением элементов и учётом зависимых отказов, вызываемых элементами. Сделан вывод о необходимости нерезервирующих методов повышения надежности и предотвращения опасных воздействий.

Ключевые слова: безопасность, отказ, зависимый отказ.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 86–90

DEPENDENT FAILURES IN MULTIFUNCTIONAL ACS

P. A. Kuznetsov

Siberian State Technological University
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
E-mail: forubox@yandex.ru

The article discusses the interference of elements of the automated control system. We study the safety and survivability. Gradation failure is given. The consequences of failure cells and modules of the system, causing failures of other cells and modules, the possibility of preventing these failures are highlighted. A range of possible dependent failures is provided. It is shown that a possible source of danger can be as module failure, and failure of backup elements in these modules. It is postulated that the increase in the number of redundant elements at least does not reduce to zero the potential danger. The various logical structures of the compound elements in ACS are discussed. A typical structure of reliability of automated control system that performs several functions, the tree structure is shown. It is deduced that one system APCS performs several functions. One spacecraft often performs several functions. Also there are functions of the ACS which do not affect the operation. And to determine the reliability of the system we must determine which elements involved in performing any functions. It is necessary to determine the sequence of elements to perform a functional task. It is illustrated by the development of failures in multi-functional systems, the mutual influence of elements in them in case of simple linear and branched redundant structures. We consider the negative effects of redundancy. An example of calculating the reliability of the system with a parallel connection of elements into account and dependent failures caused by the elements is given. The conclusion of necessity of non-redundant methods to improve reliability and hazard prevention was made.

Keywords: safety, failure, dependent failure.

Введение. Надёжность систем автоматизированного сбора данных и управления является одним из важнейших показателей. От их правильной работы зависит успешность выполнения аппаратом своей миссии. Организация IEEE определяет надежность как «способность системы или компонента выполнять требуемые функции при определенных условиях за определенный период времени». Это определение дал А. Н. Авиженис, и оно считается классическим [1; 2].

Безотказностью называется свойство системы сохранять работоспособность в течение определённого времени при нормальных условиях. Живучесть – способность технического устройства, сооружения, средства или системы выполнять основные свои функции, несмотря на полученные повреждения. Ввиду расплывчатости понятия неисправности и ущерба, их конкретизация привела к выделению двух подмножеств их состояний: «большая» неисправность – отказ, «допустимая» неисправность – дефект. Уровень тестируемости дефекта определяется как вероятность обнаружения сбоя на случайно выбранном выходе [3].

Безопасностью же называется способность системы не переходить в опасное состояние, в состояние, при котором возникает ущерб «большого масштаба». Именно для сложных систем характерной является возможность весьма сложных, многократных комбинаций отказов, каждая из которых невероятно мала, а в сумме таких невероятных состояний накапливается достаточно, чтобы система попала в опасное состояние [4–6].

Подобными последствиями отказа может быть возникновение аварии, выброс энергии или материи, причиняющей вред окружающим объектам и персоналу. Переход системы в опасное состояние вызывается отказами её функциональных модулей или их резервных элементов. Выход из строя как всего модуля, так и его элемента может привести к возникновению опасного воздействия [7].

Вероятность выхода систем, а значит, и их модулей из строя, следует уменьшать. Для создания систем с высокой надежностью применяют множество принципов: принцип упрощения, принцип контроля, принцип резервирования. Последний принцип рассмотрим более подробно. Под резервированием понимается применение определённых технических средств с целью обеспечения работоспособности объекта при отказе. В системах с резервированием выделяют основной и резервный элементы [8].

Отказ может произойти как в модуле, так и в отдельном резервном элементе. И аналогично, за неисправностью элемента может последовать выброс энергии или материи, авария. Следовательно, опасность несёт как модуль, так и его резервные элементы. Данные опасности следует разделять на опасности, возникающие из-за выхода из строя модуля и выхода из строя элемента. В случае горячего резервирования количество отказов элементов увеличивается соответственно самому количеству элементов. В случае холодного – число отказов элементов остаётся не меньшим, чем без резервирования, в то время как число отказов модуля уменьшается.

Таким образом, повышение числа резервных элементов, как минимум, не понижает до нуля потенциальную опасность. Опасные воздействия могут быть направлены на персонал и инфраструктуру предприятия, в рамках которого действует АСУ ТП, и в таком случае данными воздействиями будет причиняться ущерб [9; 10].

Зависимые отказы в однофункциональных системах. Наряду с воздействием на персонал и инфраструктуру, опасное воздействие, возникшее в результате отказа одного модуля системы, может повлиять на другие модули системы и вызвать их отказ – так называемый зависимый отказ [11–13].

АСУ имеют различную логическую структуру. В случае, когда все модули системы связаны последовательно, отказ хотя бы одного модуля приводит к отказу всей системы и зависимые отказы никак не изменяют её состояние (рис. 1).

В приведённой на рис.1 системе отказ модуля 2 вызывает зависимый отказ модуля 3, но вне зависимости от этого система будет неисправна из-за отказа модуля 2.

Более сложный случай возникает, когда система имеет разветвленную структуру, в случае, когда система выполняет несколько функций, но не все элементы участвуют в выполнении любой из функций. Тогда выход из строя одного модуля приведёт к неисправности только тех функций, в выполнении которых он участвует.

Зависимые отказы в многофункциональных системах. Как правило, одна система АСУ ТП выполняет несколько функций. Один и тот же технологический процесс (ТП), хоть и рассматривается как единое целое, зачастую исполняет несколько функций. Также у самой АСУ имеются функции, не влияющие на процесс. И для определения надежности системы необходимо определять, какие элементы участвуют в выполнении каких функций. Необходимо определять последовательности элементов, выполняющие ту или иную функциональную задачу. Данная процедура разделения имеющейся системы на подсистемы (компоненты) называется декомпозицией [14].

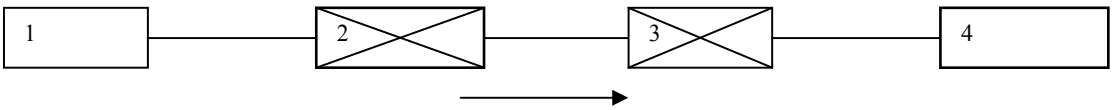


Рис. 1. Зависимый отказ в системе последовательно соединённых модулей

Декомпозиция как процесс расчленения позволяет рассматривать любую исследуемую систему как сложную, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем, которые, в свою очередь, также могут быть расчленены на части. При декомпозиции каждое расчленение образует свой уровень. На этапе декомпозиции, обеспечивающем общее представление системы, осуществляются определение и декомпозиция общей цели исследования и основной функции системы как ограничение траектории в пространстве состояний системы или в области допустимых ситуаций. Наиболее часто декомпозиция проводится путем построения дерева целей и дерева функций.

Глубина декомпозиции ограничивается [15]. Декомпозиция должна прекращаться, если необходимо изменить уровень абстракции – представить элемент как подсистему. Если при декомпозиции выясняется, что модель начинает описывать внутренний алгоритм функционирования элемента вместо закона его функционирования в виде «черного ящика», то в этом случае произошло изменение уровня абстракции. Это означает выход за пределы цели исследования системы и, следовательно, вызывает прекращение декомпозиции.

Функциональная декомпозиция базируется на анализе функций системы. При этом ставится вопрос, что делает система, независимо от того, как она работает. Основанием разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов. С целью получения более полного представления о системе и её связях в структуру включают надсистему и составляющие её части [14; 15].

Чаще всего АСУ имеет древовидную структуру, когда из одной функциональной последовательности, выполняющей функцию получения конечного продукта, ответвляются иные функции, преимущественно функции контроля параметров системы [16].

В некоторых ситуациях выход из строя элемента, находящегося в горячем резерве, может повлиять на основной элемент.

Многократно зарезервированный «коренной» модуль при выходе из строя его элемента может как выводить из строя надёжностно, логически не связанную с ним последовательность, так и нести повышенную опасность в общем.

Рис. 2 иллюстрирует вышесказанное. Имеется система, выполняющая две функции. Первую функцию выполняют модули 1 и 2, вторую – 1 и 3. Причём модуль 2 дублирован.

Собственный отказ резервного элемента 2.2 модуля 2 не приводит к прекращению выполнения первой функции. Но этот отказ вызывает зависимый отказ модуля 3, и из-за него прекращается выполнение второй функции.

Таким образом, избыточность одного модуля предотвращает его отказ, но одновременно вызывает отказ других модулей системы и, следовательно, выводит другие функции из строя. Следовательно, при расчёте безотказности необходимо учитывать вероятность выхода системы из строя из-за зависимых отказов.

Расчёт надежности с учётом зависимых отказов. Учёт зависимых отказов весьма серьёзно изменяет модель надежности системы. К примеру, если учитывать возможность вызова зависимого отказа элементом модуля, в том числе и резервным, у нас появляется способ учесть вероятность того, что повышение степени резервирования будет уменьшать надежность системы, с определённой вероятностью при отказе разрушая другие модули. Рассмотрим иллюстрирующий это пример (рис. 3).

Возьмём систему, состоящую из двух последовательно соединённых модулей, причём второй модуль имеет n-кратное резервирование. Положим, что P_1 – вероятность безотказной работы элемента первого модуля; P_2 – вероятность безотказной работы элемента второго модуля.

Без учета зависимых отказов вероятность безотказной работы

$$P = P_1(1 - (1 - P_2)^n).$$

Теперь предположим, что каждый элемент второго модуля имеет вероятность вызвать отказ первого модуля. Положим, что P_d – вероятность вызова отказом второго модуля отказа первого.

Система будет исправна при следующих событиях:

S_1 – первый модуль собственно исправен;

S_2 – исправен хотя бы один из элементов второго модуля;

S_3 – не произошёл зависимый отказ первого модуля, вызванный элементом второго.

Следовательно, для безотказности системы должно быть верным следующее выражение:

$$S_1 \wedge S_2 \wedge S_3 .$$

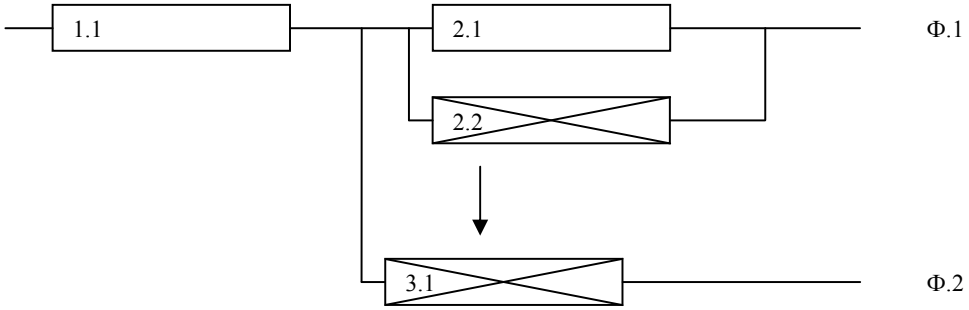


Рис. 2. Зависимый отказ в многофункциональной АСУ

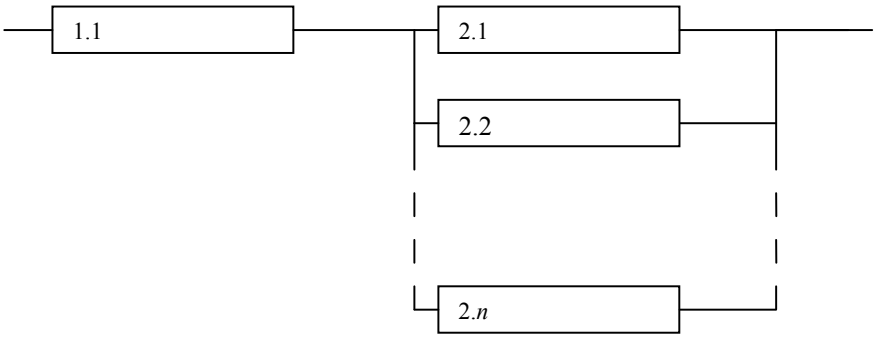


Рис. 3. Система с избыточностью и зависимыми отказами

Вероятность S_1 равна P_1, а вероятность события S_2 определяется по формуле

$$P_{s_2} = 1 - (1 - P_2)^n.$$

Вероятность события S_3 находится как обратная вероятность наступления двух событий одновременно (отказ элемента второго модуля и вызов им зависимого отказа):

$$P_{s_3} = 1 - (1 - P_2^n)P_d.$$

Вероятность безотказной работы с учетом этого вычисляется как

$$P = P_1(1 - (1 - P_2)^n)\cdot(1 - (1 - P_2^n)\, P_d). \qquad (1)$$

Заключение. Выражение (1) показывает, что при увеличении избыточности резервирования надежность системы с учётом зависимых отказов одновременно и растёт из-за резервирования, и убывает из-за наличия зависимых отказов. Следовательно, для повышения надежности систем следует применять иные, чем введение избыточных элементов, методы повышения надежности и вводить меры предотвращения опасных воздействий.

Таким образом, представленная формализация подхода к оценке надежности АСУ с зависимыми отказами позволяет построить модель, которая будет обладать большей гибкостью, учитывать влияние опасных ситуаций на безотказность многофункциональных АСУ.

Библиографические ссылки

1. Авиженис А. Н., Лапри Ж. К. Гарантоспособные вычисления: от идей до реализации в проектах // ТИИЭР. 1986. Т. 74, № 5. С. 8–21.

2. Курочкин Ю. А., Смирнов А. С., Степанов В. А. Надежность и диагностирование цифровых устройств и систем. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 1993. 320 с.

3. Ковалев И. В. Анализ проблем в области исследования надежности программного обеспечения: многоэтапность и архитектурный аспект // Вестник СибГАУ. 2014. № 3 (55). С. 78–92.

4. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2007. 276 с.

5. Надежность технических систем : учеб. пособие / под общ. ред. Е. В. Сугака и Н. В. Василенко. Красноярск : НИИ СУВПТ, 2000. 608 с.

6. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М. : Наука, 2006. 410 с.

7. К вопросу оценки надежности АСУ с блокирующими модулями защиты / И. В. Ковалев [и др.] // Приборы. 2013. Вып. 6. С. 20–24.

8. Кузнецов П. А., Бесчастная Н. А., Бахмарева К. К. Модификация метода Волковича–Михалевича с целью оптимизации затрат при синтезе отказоустойчивых информационно-вычислительных систем // Вестник СибГАУ. 2012. № 6(46). С. 97–100.

9. ГОСТ Р 22.10.01–2001. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Оценка ущерба. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: http://vsegost.com/Catalog/64/6474.shtml (дата обращения: 12.02.2015).

10. Безопасность и надежность технических систем : учеб. пособие / Л. Н. Александровская [и др.] М. : Логос, 2004. 280 с.

11. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: http://vsegost.com/Catalog/11/11290.shtml (дата обращения: 12.02.2015).

12. Общие положения обеспечения безопасности ядерных энергетических установок судов : федер. нормы и правила в области использования атомной энергии НП-022-2000 (утв. постановлением Госатомнадзора РФ от 27 сентября 2000 г. № 5).

13. IAEA-TECDOC-probabilistic safety assessment [Электронный ресурс]. Vienna, Austria, 1992, 36 p. URL: http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/908/Procedures-for-Conducting-Common-Cause-Failure-Analysis-in-Probabilistic-Safety-Assessment (дата обращения: 12.02.2015).

14. Родионов М. Г. Информационно-измерительные системы: теория систем и системный анализ : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. 83 с.

15. Хорошев А. Н. Введение в управление проектированием механических систем : учеб. пособие. Белгород, 1999. 372 с.

16. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций : учебник для вузов / под ред. А. А. Васильева. 2-е изд. М. : Энергоатомиздат, 1991. 600 с.

References

1. Avizhenis A. N., Lapri Zh. K. [Guarantee-able calculations: from the idea to realization in projects]. *TIIER*. 1986, vol. 5, p. 8–21 (In Russ.).

2. Kurochkin Yu. A., Smirnov A. S., Stepanov V. A. *Nadezhnost' i diagnostirovanie tsifrovykh ustroystv i sistem* [Reliability and diagnostics of digital systems]. St.Petersburg, St.Petersburg University Publ., 1993, 320 p.

3. Kovalev I. V. [Analysis of the problems in the study of the reliability of the software: multi-stage and architectural aspects]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 3(55), p. 78–92 (In Russ.).

4. Ryabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem* [Reliability and safety of structural complex systems]. St.Petersburg, St.Petersburg University Publ., 2007, 276 p.

5. Sugak E. V, Vasilenko N. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. Uchebnoe posobie dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Reliability of technical systems. Study guide]. Krasnoyarsk, NII SUVPT Publ., 2000, 608 p.

6. Okhtilev M. Yu. Sokolov B. V. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamikoy slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov* [Intelligent technologies for monitoring and management of the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka Publ. 2006, 410 p.

7. Kovalev I. V., Kuznetsov P. A., Zelenkov P. V., Shaydurov V. V., Bakhmareva K. K. [To the question of the reliability of automated control systems with blocking protection modules]. *Pribory*. 2013, vol. 6, p. 20–24 (In Russ.).

8. Kuznetsov P. A., Beschastnaya N. A., Bakhmareva K. K., Antamoshkin O. A., Antamoshkin A. N. [Modification of the Volkovich`s-Michalevi`c method to optimize costs in the synthesis of fault-tolerant information systems]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 6(46), p. 97–100 (In Russ.).

9. *GOST R 22.10.01–2001. Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh. Otsenka ushcherba. Terminy i opredeleniya* [State Standart R 22.10.01–2001. Safety in emergencies. Damage assessment. Terms and definitions.] (In Russ.) Available at: http://vsegost.com/Catalog/64/6474.shtml (accessed 12.02.2015).

10. Aleksandrovskaya L. N., Aronov I. Z., Kruglov V. I., Kuznetsov A. G., Patrakov N. N., Sholom A. M. *Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. Uchebnoe posobie* [Safety and reliability of technical systems. Study guide]. Moscow, Logos Publ., 2004, 280 p.

11. *GOST 27.002–89. Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [State Standart 27.002–89. Reliability in the technology. Basic concepts. Terms and Definitions] (In Russ.) Available at: http://vsegost.com/Catalog/11/11290.shtml (accessed 12.02.2015).

12. RF Federal Standards and Rules in the Field of Nuclear Energy NP-022-2000 “General provisions to ensure the safety of nuclear powered vessels” 27.09.2000 (In Russ.) Available at: http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=424308 (accessed 12.05.2015).

13. IAEA-TECDOC-probabilistic safety assessment, Vienna, Austria, 1992, 36 p. Available at http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/908/Procedures-for-Conducting-Common-Cause-Failure-Analysis-in-Probabilistic-Safety-Assessment (accessed 12.02.2015).

14. Rodionov M. G. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy: teoriya sistem i sistemnyy analiz: uchebnoe posobie* [Information-measuring system: systems theory and systems analysis: a study guide] Omsk, OmGU Publ., 2011, 83 p.

15. Khoroshev A. N. *Vvedenie v upravlenie proektirovaniem mekhanicheskikh sistem: Uchebnoe posobie.* [Introduction to the management of designing mechanical systems: Study guide]. Belgorod, 1999, 372 p.

16. Vasil'ev A. A. *Elektricheskaya chast' stantsiy i podstantsiy Uchebnik dlya vuzov.* [Electric part of stations and substations. Study guide for high schools]. Moscow, Energoatomizdat Pabl., 1991, 600 p.

© Кузнецов П. А., 2015

УДК 621.396

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 91–96

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОЧАСТОТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ИОНОСФЕРЕ

А. С. Курносов*, Ю. Л. Фатеев

Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28
*E-mail: kurnosov89@gmail.com

Предметом исследования является одночастотный метод определения вертикальной задержки сигнала в ионосфере. Целью работы является проверка метода на данных модели. Для проверки работоспособности предложенного одночастотного метода применялся метод имитационного моделирования. Рассмотрены существующие подходы для определения задержки сигнала в ионосфере. Существующие методы обладают недостатками, снижающими точность определения задержки сигнала в ионосфере. Двухчастотный кодовый метод содержит систематическую погрешность, вызванную трактами аппаратуры. Применение двухчастотного фазового метода требует разрешения фазовой неоднозначности. Стандартный одночастотный метод использует прямые измерения кодовой и фазовой псевдодальности и, соответственно, обладает недостатками кодового и фазового методов, описанных выше. Решением данной проблемы является переход от прямых измерений к использованию приращений соответствующих измерений. Данный подход реализован в одночастотном методе, использующем в своей основе приращения кодовых и фазовых измерений. Приведено подробное описание данного метода и результаты моделирования. По результатам моделирования подтверждена работоспособность метода на данных модели, а также сделан вывод о необходимости проведения экспериментальных исследований разработанного метода.

Ключевые слова: ионосфера, одночастотный метод, задержка сигнала в ионосфере, вертикальная задержка, двухчастотный метод, фильтрация измерений.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 91–96

SINGLE-FREQUENCY METHOD SIMULATION FOR DETERMINATION OF VERTICAL IONOSPHERIC SIGNAL DELAY

A. S. Kurnosov*, Y. L. Fateev

Siberian Federal University, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics
28, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
*E-mail: kurnosov89@gmail.com

The actual problem of recent global navigation satellite systems is increasing of positioning accuracy. This problem has several solutions. The first one is decreasing of pseudorange measurements error. The significant contribution in the budget of the pseudorange error is signal delay in the ionosphere. The contribution of the ionospheric error could be 60 percent of this budget. Therefore, the ionospheric error exception will have resulted in significant increasing of positioning accuracy.

The research subject is a single-frequency method of determining the vertical signal delay in the ionosphere. The purpose of work is verification the method on model data. Single-frequency method verification was performed using simulation modeling. The article considers existing approaches for determining signal delay in the ionosphere. The dual-frequency method contains the systematic error due to satellite and receiver hardware delays. Dual-frequency phase method usage requires phase ambiguity resolution. Standard single-frequency method uses direct measurements of code and phase pseudorange, and respectively has limited precision as well as dual-frequency methods described above. The solution of this problem is usage of measurement first differences instead of direct measurements. This approach is realized in the one-frequency method based on code and phase measurement first differences.

The article gives a detailed description of this method and the results of the simulation. Simulation results has confirmed efficiently of this method and allows starting experimental researches.

Keywords: ionosphere, one-frequency method, dual-frequency method, ionospheric delay, measurement filtration.

Введение. Актуальной задачей современной спутниковой радионавигации является повышение точности определения координат потребителя. Данная задача имеет несколько решений. Одним из решений является уменьшение погрешностей при измерениях псевдодальности.

Наибольший вклад в бюджет погрешности измерения псевдодальности вносит задержка сигнала в ионосфере. Вклад ионосферы в бюджет погрешности измерения псевдодальности составляет около 60 % [1; 2]. Соответственно, исключение погрешности приведет к существенному повышению точности определения координат потребителя.

В настоящее время для компенсации задержки сигнала в ионосфере в режиме реального времени используются двухчастотные методы [3–5]. Данные методы имеют свои недостатки. Двухчастотный кодовый метод имеет систематическую погрешность, обусловленную задержкой сигнала в трактах навигационной аппаратуры. Двухчастотные фазовые методы использовать напрямую не представляется возможным из-за необходимости разрешения фазовой неоднозначности.

Стандартные методы определения задержки сигнала в ионосфере. Воспользуемся допущением, что ионосфера представляет собой тонкий слой на некоторой высоте h, в котором сосредоточены все свободные электроны (рис. 1). Тогда наклонную задержку сигнала в ионосфере можно представить как произведение вертикальной задержки на величину удлинения пути сигнала [3]:

$$I_{\text{н}} = I_0 \cdot OF, \tag{1}$$

где I_0 – вертикальная задержка сигнала в ионосфере; $OF = 1/\cos\beta$ – фактор наклона.

Исходя из геометрии рисунка, применяя теорему синусов, можно определить фактор наклона [2–4]:

$$OF(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{R_{\text{e}}}{R_{\text{e}}+h}\cdot\cos(\gamma)\right)^2}}, \tag{2}$$

где R_{e} – радиус Земли; h – средняя высота ионосферного слоя (~ 350 км); γ – угол места НКА.

Задержку сигнала в ионосфере можно определить, используя дисперсионные свойства ионосферы, а именно, зависимость ионосферной задержки от частоты сигнала [4; 6; 7]. Данный подход реализован в стандартных методах определения задержки сигнала в ионосфере. Например, считается, что разность между псевдодальномерными кодовыми измерениями на несущих частотах будет целиком определяться ионосферной погрешностью:

$$I_{\text{н}} = \frac{{f_{L2}}^2}{{f_{L1}}^2 - {f_{L2}}^2}\cdot\left((P_{L2}-P_{L1})+\Delta\delta R\right), \tag{3}$$

где P_{L1} и P_{L2} – псевдодальности, соответственно, на $L1$ или $L2$; $\Delta\delta R$ – погрешности, вызванные трактами навигационной аппаратуры и тратами НКА.

Данное утверждение не вполне состоятельное, потому что при разности псевдодальностей исключаются все частотно независимые погрешности, но между тем остаются погрешности, вызванные трактами навигационной аппаратуры и трактами НКА. В конечном итоге, данные систематические погрешности включаются в ионосферную погрешность, что не совсем корректно для оценки истинного значения задержки сигнала в ионосфере. Для исключения погрешностей, связанных с трактами навигационной аппаратуры и трактами НКА, применяется калибровка аппаратуры [8–10].

Стоит отметить, что наряду с указанными недостатками двухчастотный кодовый метод включает в себя достаточно большую погрешность, обусловленную шумом кодовых измерений. Для уменьшения влияния данной составляющей применяют менее шумные фазовые измерения, которые несут в себе фазовую неоднозначность:

$$I_{\text{н}} = \frac{{f_{L2}}^2}{{f_{L1}}^2 - {f_{L2}}^2}\times \\ \times\left(\lambda_{L1}(\Phi_{L1}-N_{L1})-\lambda_{L2}(\Phi_{L2}-N_{L2})+\Delta\delta R\right), \tag{4}$$

где Φ – фазовая псевдодальность, измеренная в циклах; N – неоднозначности фазовых измерений; λ – длина волны; $\Delta\delta R$ – погрешности, вызванные трактами навигационной аппаратуры и тратами НКА.

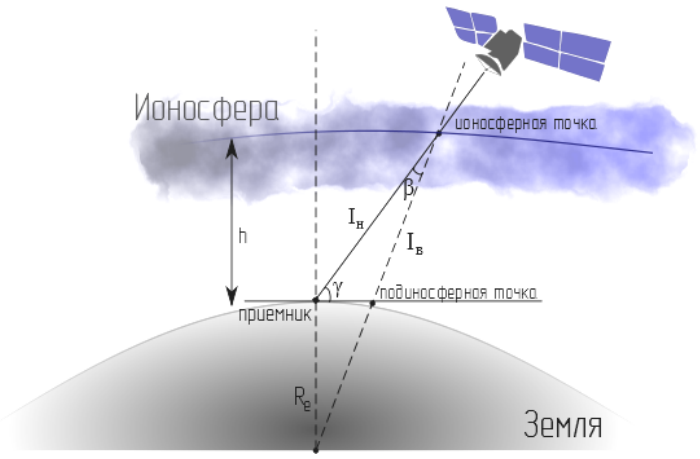


Рис. 1. Прохождение сигнала через ионосферу

Наряду с двухчастотными методами существует одночастотный метод, использующий в своей основе кодовые и фазовые измерения на одной несущей частоте:

$$I_{н} = \frac{R - L}{2}, \quad (5)$$

где R и L – кодовая и фазовая псевдодальность соответственно.

Данный метод избавлен от погрешностей, присущих двухчастотным методам. Тем не менее использовать напрямую одночастотный метод невозможно, поскольку кодовые измерения псевдодальности имеют систематическую погрешность, а псевдодальномерные измерения по фазе содержат неоднозначность [4].

Одночастотный метод определения задержки сигнала в ионосфере. Систематические погрешности и фазовую неоднозначность, присутствующие в псевдодальномерных измерениях по коду и фазе несущей (дискретность измерений одна секунда), можно считать квазипостоянными. Соответственно, приращения соответствующих измерений погрешностей содержать не будут [11; 12].

Запишем уравнение (5) с учетом того, что кодовая и фазовая псевдодальности являются приращениями соответствующих измерений:

$$\Delta I_{н} = \frac{\Delta R - \Delta L}{2}, \quad (6)$$

где ΔR – приращение кодовой псевдодальности; аналогично ΔL – приращение фазовой псевдодальности; i – момент времени.

Приращение наклонной задержки в ионосфере обусловлено изменением фактора наклона и вертикальной задержки:

$$\Delta I_{н} = \Delta OF(\gamma) \cdot I_{в} + OF(\gamma) \cdot \Delta I_{в}, \quad (7)$$

где $\Delta OF(\gamma)$ – приращение наклонного фактора; $I_{в}$ и $\Delta I_{в}$ – вертикальная задержка и ее приращение; i – момент времени.

Вертикальная задержка является медленно меняющейся функцией во времени, соответственно, приращения данной функции будут очень малы и, как следствие, можно пренебречь вторым слагаемым правой части уравнения (7):

$$\Delta I_{н} = \Delta OF(\gamma) \cdot I_{в}. \quad (8)$$

Из выражения (8) достаточно легко определить значение вертикальной задержки сигнала в ионосфере, но стоит учесть тот факт, что при использовании односекундных приращений наклонный фактор и наклонная задержка сигнала изменяются незначительно, но при этом шум измерений остается неизменным [13]. В результате зашумленности измерений погрешность определения вертикальной задержки будет больше, чем полезный сигнал.

Для исключения данного недостатка необходимо увеличивать длительность интервала измерений. Длительность интервала можно увеличить за счет накопления односекундных приращений. При этом увеличивая длительность интервала, нужно помнить о выполнении ограничений, накладываемых на функцию вертикальной задержки. Ограничения, накладываемые на функцию, заключаются в том, что нельзя увеличивать до бесконечности интервал измерений, иначе условие о медленно изменяющейся функции перестанет выполняться.

Фильтрация измерений. Измерения параметров ионосферы поступают непрерывно, если применять постоянный интервал для накопления измерений, то данный алгоритм, во-первых, потребует больших затрат памяти на хранение всего массива измерений, а во-вторых, результат нельзя получить раньше, чем наберется необходимое количество измерений.

Для того чтобы избежать данных ограничений, целесообразно использовать рекуррентный алгоритм, при котором новое измерение будет использоваться для уточнения решения, полученного ранее. Другим важным условием является необходимость постепенного выведения «устаревших» данных из алгоритма. Соответственно, измерения, которые приходят позже, должны иметь больший вес по сравнению с данными, которые уже используются. В расчете это реализуется с помощью введения коэффициента фильтра k [14; 15].

Пусть имеются измерения на некотором интервале секунд. Уравнение для наклонной задержки по одному НКА будет иметь следующий вид:

$$I_{ф}(i) = (1 - k) \cdot I_{ф}(i - 1) + \Delta I_{н}(i), \quad (9)$$

где $I_{ф}$ – фильтрованное значение наклонной задержки; k – коэффициент фильтра ($0 < k < 1$); $\Delta I_{н}$ – односекундные приращения наклонной задержки; i – момент времени.

Метод основывается на гипотезе, что задержка сигнала в ионосфере – медленно меняющаяся функция от времени, поэтому коэффициент k подбирается так, чтобы изменения ионосферы не оказывали влияния на алгоритм.

Аналогично выражению (9) можно произвести фильтрацию полных приращений наклонного фактора, затем подставляя полученные фильтрованные значения в (8), можно найти значение вертикальной задержки сигнала. Анализируя поведение НКА на высоких углах места, можно сделать вывод, что приращения наклонного фактора при положении НКА, близком к зениту, будут незначительны по сравнению с приращениями вертикальной задержки. Данное обстоятельство указывает на то, что в таком случае нельзя пренебрегать правой частью выражения (7). Следовательно, работать только по одному НКА неэффективно, поэтому необходимо в расчете использовать все видимое созвездие НКА, но при этом необходимо уменьшать вес НКА с высоким углом места, для реализации этого применим метод наименьших квадратов.

Определение вертикальной задержки сигнала. Предположим, что вертикальная задержка сигнала в зоне радиовидимости будет мало различаться для каждого отдельного НКА. Выполним подстановку фильтрованных значений наклонной задержки и фактора наклона для каждого НКА в уравнение (1) и получим переопределенную систему линейных уравнений.

Для решения данной системы уравнений и нахождения суммарной вертикальной задержки сигнала в ионосфере по всем видимым НКА применим метод наименьших квадратов. В целях упрощения покажем подход для текущего момента времени.

Для нахождения вертикальной задержки сигнала в ионосфере (I_0) необходима минимизация следующего функционала:

$$F = \sum_{j=1}^{N} \left(I_{\text{ф}j} - I_0 \cdot OF_{\text{ф}j} \right)^2, \qquad (10)$$

где $I_{\text{ф}j}$ – фильтрованное значение наклонной задержки для j НКА; $OF_{\text{ф}j}$ – фильтрованное значение наклонного фактора для j НКА; j – номер НКА; N – общее количество видимых НКА.

Запишем необходимое условие экстремума $\frac{\partial F}{\partial I_0}$:

$$2\sum_{j=1}^{N} \left(-2I_{\text{ф}j} \cdot OF_{\text{ф}j} + 2I_0 \cdot OF_{\text{ф}j}^2 \right) = 0. \qquad (11)$$

Запишем полученный результат:

$$I_0 = \sum_{j=1}^{N} \left(OF_{\text{ф}j} \cdot I_{\text{ф}j} \right) \Big/ \sum_{j=1}^{N} \left(OF_{\text{ф}j}^2 \right). \qquad (12)$$

Моделирование одночастотного метода. Для проверки метода было выполнено моделирование. В качестве исходных данных при моделировании использовались данные углов места, полученные с навигационного приемника типа МРК за период с 4 по 6 мая 2013 г., а также истинная вертикальная задержка сигнала. В качестве модели для истинной вертикальной задержки сигнала в ионосфере была выбрана модель Клобучара [3].

Используя значения углов места с помощью выражения (2), находим наклонные факторы для всех НКА. Затем задаем истинную вертикальную задержку сигнала согласно модели Клобучара [3]:

$$I_0 = \begin{cases} A_1 + A_2 \cdot \cos\left(\dfrac{2 \cdot \pi (t - A_3)}{A_4} \right), |t - A_3| < A_4/4, \\ \text{иначе } A_1, \end{cases} \qquad (13)$$

где $A_1 = 5 \cdot 10^{-9}$ с – значение зенитной задержки в ночное время; $A_2 = \sum_{i=0}^{3} \alpha_{i-1} \cdot \Phi_m^{i-1}$ – амплитуда функции косинуса для дневных величин; $A_3 = 50400$ с – фаза, соответствующая пику функции косинуса; $A_4 = \sum_{i=0}^{3} \beta_{i-1} \cdot \Phi_m^{i-1}$ – период функции косинуса (≥ 72000 с); $\Phi_m = \Phi_i + 0,064 \cdot \cos(\lambda_i - 1,617)$ – геомагнитная широта подыоносферной точки; Φ_i и λ_i – широта и долгота пользователя в полуциклах.

Предполагая, что истинная вертикальная задержка сигнала равна по всем НКА, применив (1) находим истинную наклонную задержку сигнала для каждого НКА. На данном этапе в истинную наклонную задержку сигнала каждого НКА добавляется белый гауссов шум. При обработке реальных измерений было установлено, что шум кодовых измерений лежит в пределах 0,5–0,7 м. Для моделирования была выбрана амплитуда шума 0,5 м.

На следующем этапе находим односекундные приращения для наклонного фактора, для этого вычисляется разность между текущим и последующим измерением. В выбранной модели кодовые и фазовые измерения, представленные в (6), разделить невозможно, поэтому находятся сразу односекундные приращения наклонной задержки сигнала.

Для правильной работы алгоритма необходимо следить за моментами прихода и ухода НКА, потому что в данные моменты будут наблюдаться выбросы измерений в односекундных приращениях, которые в итоге снижают точность определения вертикальной задержки сигнала. Для исключения выбросов из расчета необходимо следить за измерениями наклонного фактора и в момент времени, соответствующий выбросу, исключать как приращения наклонного фактора, так и приращения наклонной задержки сигнала.

Затем с помощью вышеуказанных подходов находится вертикальная задержка сигнала. Важным этапом в моделировании является подбор коэффициента фильтра. На рис. 2 представлена вертикальная задержка сигнала для различных коэффициентов. Коэффициент фильтра выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимум шумов вертикальной задержки и в то же время обеспечить квазистационарность ионосферы за время постоянной фильтра. На рис. 3 представлено количество видимых спутников за двухдневный период.

Сравнивая полученную и исходную задержку сигнала между собой, можно утверждать, что одночастотный метод определения вертикальной задержки сигнала работоспособен, а расхождения между исходной и полученной задержкой вызваны изменениями в ионосфере и выбранной моделью шумов псевдодальномерных измерений.

Заключение. Таким образом, результаты, полученные в ходе моделирования, подтверждают работоспособность одночастотного метода. В ходе моделирования было еще раз подтверждена необходимость выбора коэффициента фильтра. Главным критерием выбора коэффициента фильтра служит постоянство ионосферы за время постоянной фильтра.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что одночастотный метод позволяет определять вертикальную задержку сигнала в ионосфере с более высокой точностью, чем описанные методы, поскольку для данного метода будут отсутствовать недостатки, присущие существующим методам. В конечном итоге, на точность данного метода будут влиять флуктуации часов приемника и НКА, а также флуктуации задержки сигнала в ионосфере и шум измерений. Для определения точности данного метода в будущем планируется проведение эксперимента на реальных данных.

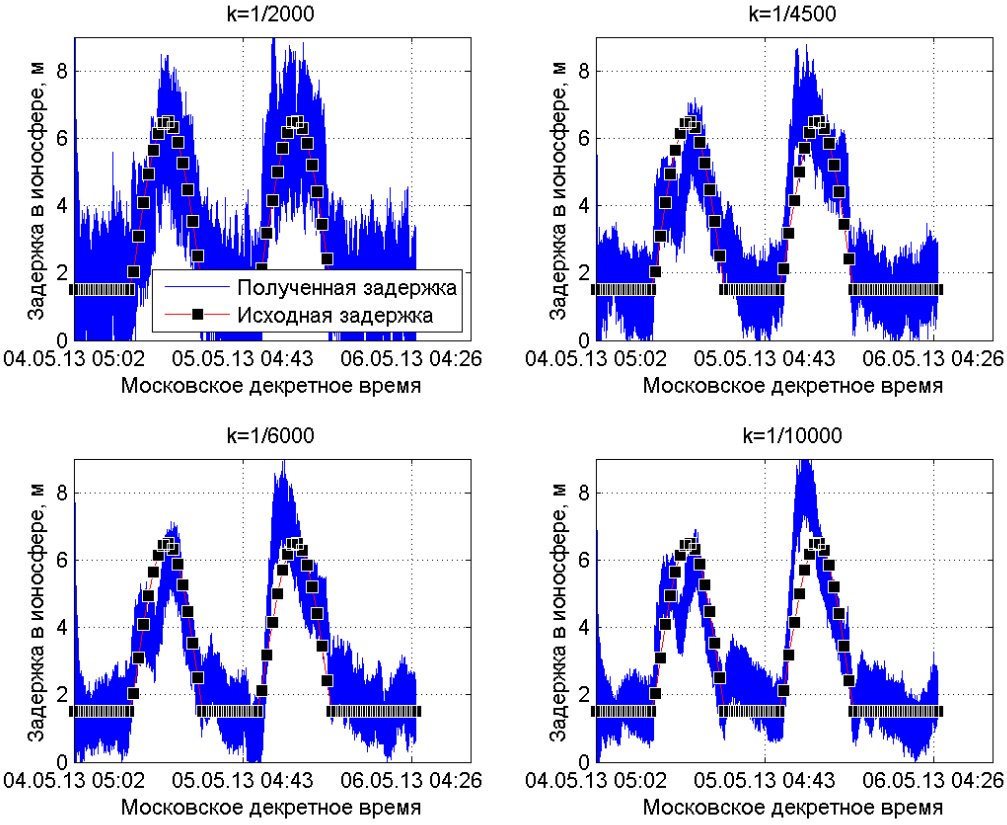


Рис. 2. Вертикальная задержка в ионосфере

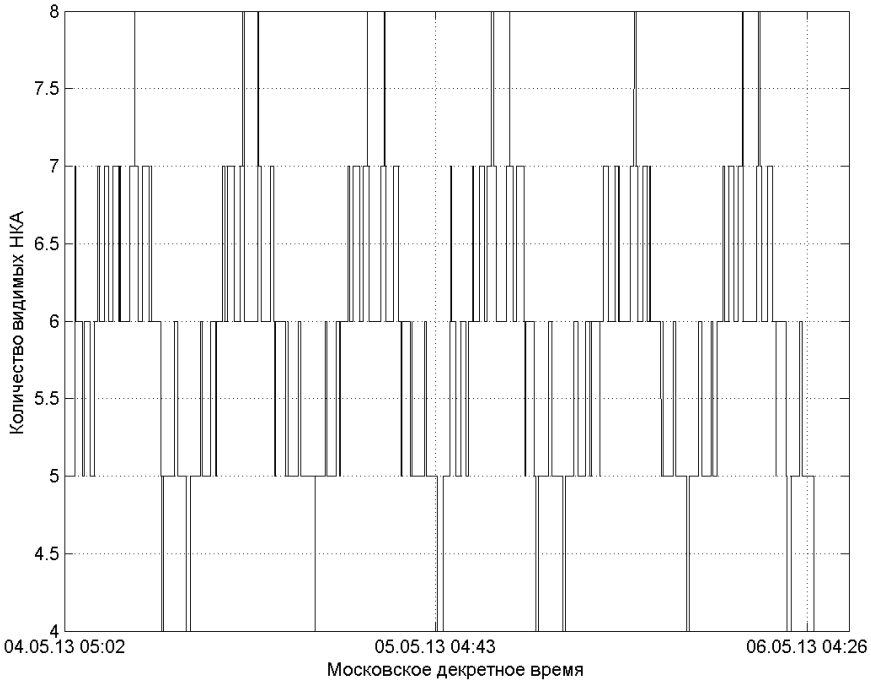


Рис. 3. Количество видимых спутников

Библиографические ссылки

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

2. Верещагин А. И., Фатеев Ю. Л. Исследование компенсации многолучевости стационарного навигационного приемника // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 43–45. ISSN 2070-0784.

3. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. В 2 т. Т. 1 / Сибирская государственная геодезическая академия. М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.

4. Харисов В. Н., Перов А. И., Болдин В. А. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.

5. Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Switzerland, 1999. 205 p. ISBN: 9783908440017.

6. Дымович Н. Д. Ионосфера и ее исследование. М. : Энергия, 1964. 40 с.

7. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. Delft University of Technology, 2009. 242 p.

8. Способ определения погрешности формирования псевдодальности навигационного сигнала : пат. 2498225 Рос. Федерация. № 2012125480/28 ; заявл. 19.06.2012 ; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. 8 с.

9. Гребенников А. В. Исследование методов и разработка аппаратуры приема и обработки сигналов спутниковых радиотехнических систем : дис. … канд. техн. наук : 05.12.21. Красноярск : КГТУ, 2000. 97 с.

10. Демьянов В. В. Коррекция глобальной модели полного электронного содержания по текущим измерениям ионосферной задержки сигналов спутниковых радионавигационных систем : дис. … канд. техн. наук : 01.04.03. Иркутск, 2000. 136 с.

11. Nisher P., Trethewey M. GPS Ionosphere Determination Using L1 Only // Proceedings of the 1996 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. Santa Monica, CA, 1996, Pp. 625–635.

12. Определение параметров движения космического аппарата бортовой навигационной системой по измерениям псевдоскорости и псевдодальности спутниковых навигационных систем / Э. Л. Аким [и др.] // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2004. № 20.

13. Kurnosov A. S., Fateev Y. L. Ionosphere parameters definition // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). September 12−13, Krasnoyarsk. Proceedings. Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693622.

14. Эконометрия : учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 744 с.

15. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. М. : Радио и связь, 1997. 112 с.

References

1. Afraymovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verkhney atmosfery Zemli* [GPS - monitoring of the Earth's upper atmosphere]. Irkutsk, GU NTs RVKh VSNTs SO RAMN Publ., 2006. 480 p.

2. Vereshchagin A. I., Fateev Yu. L., [Investigation of stationary navigation receiver multipath compensation]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki.* Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, no. 9, p. 43–45 (In Russ.).

3. Antonovich K. M. *Ispol'zovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii.* [Satellite navigation systems in geodesian application]. Moscow, FGUP "Kartgeotsentr" Publ., 2005, 334 p.

4. Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A., *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya.* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p.

5. Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Ph.D.dissertation. ISBN: 9783908440017. Switzerland. Publ., 1999, 205 p.

6. Dymovich N. D. *Ionosfera i ee issledovanie* [Ionosphere and its investigation.]. Moscow, Energiya Publ., 1964, 40 p.

7. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. Ph.D. dissertation Delft University of Technology, 2009, 242 p.

8. Vereshchagin A. I., Fateev Yu. L., Novikov V. B., Golenok A. I., Tyapkin V. N., Shtro P. I. *Sposob opredeleniya pogreshnosti formirovaniya psevdodal'nosti navigatsionnogo signala* [The error estimation method of the formation of navigation signal pseudorange]. Patent RF, no. 2498225, 2013.

9. Grebennikov A. V. *Issledovanie metodov i razrabotka apparatury priema i obrabotki signalov sputnikovykh radiotekhnicheskikh sistem. Diss. Kand. Tekhn. nauk* [Methods research and satellite radioelectronic system signals reception and processing equipment development. Cand. of technical sciences diss.]. Krasnoyarsk, 2000, 97 p.

10. Dem'yanov V. V. *Korrektsiya global'noy modeli polnogo elektronnogo soderzhaniya po tekushchim izmereniyam ionosfernoy zaderzhki signalov sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem. Diss. kand. tekhn. nauk* [Global total electron content model correction according to current measurements of GNSS signal ionospheric delay. Cand. of techn. sciences diss.] Irkutsk, 2000, 136 p.

11. Nisher P., Trethewey M. GPS Ionosphere Determination Using L1 Only. *Proceedings of the 1996 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Santa Monica, CA,* January 1996, p. 625–635.

12. Akim E. L., Kapralov M. A., Stepan'yants V. A., Tuchin A. G., Tuchin D. A. *Opredelenie parametrov dvizheniya kosmicheskogo apparata bortovoy navigatsionnoy sistemoy po izmereniyam psevdoskorosti i psevdodal'nosti sputnikovykh navigatsionnykh sistem* [Space vehicle motion parameters definition by on-board navigation system over GNSS pseudovelocity and pseudorange measurements]. Preprint IPM im. M. V. Keldysha RAN N 20, Moscow, 2004.

13. Kurnosov A. S., Fateev Y. L. Ionosphere parameters definition. *2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).* Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12−13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693622.

14. Suslov V. I., Ibragimov N. M., Talysheva L. P., Tsyplakov A. A. *Ekonometriya. Uchebnoe posobie.* [Econometrics. Textbook]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN Publ., 2005, 744 p.

15. Greshilov A. A., Stakun V. A., Stakun A. A. *Matematicheskie metody postroeniya prognozov.* [Mathematical methods for constructing forecasts]. Moscow. Radio i svyaz'. Publ., 1997, 112 p.

© Курносов А. С., Фатеев Ю. Л., 2015

УДК 621.3.07

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 97–103

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АНТЕННЫ РАДИОЛОКАТОРА СЕКТОРНОГО ОБЗОРА В РЕЖИМЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ

В. О. Нагорный[1], А. В. Аристов[2*]

[1]АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634041, г. Томск, просп. Кирова, 56в
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634034, г. Томск, просп. Ленина, 30
[*]E-mail: parist@sibmail.com

Предметом исследования является принцип формирования режима пульсирующего движения для управления электроприводом антенны радиолокационной станции секторного обзора, основанный на фазной модуляции питающих напряжений двухфазного асинхронного двигателя с прерыванием одного из них тогда, когда электромагнитный момент переходит через ноль.

Цель работы – получение расчетных соотношений, позволяющих установить связь между выходными параметрами электропривода и параметрами исполнительного двигателя, источников питания и нагрузки при потенциальной фазовой модуляции.

Разработана методика расчета электропривода с пульсирующим законом движения, основанная на решении системы уравнений в операторной форме, описывающих обобщенную электрическую машину, методом Крамера относительно токов фаз асинхронного двигателя. С использованием полученных токов фаз обобщенной электрической машины вычисляется электромагнитный момент. Следующий шаг состоит в том, что из электромагнитного момента выделяются пусковая и демпфирующая составляющие. Далее решается уравнение движения относительно перемещения подвижного элемента, позволяющее связать указанные токи с выходными параметрами электропривода, для чего служит метод гармонического баланса.

В результате исследований получены инженерные расчетные соотношения, которые дают возможность установить взаимосвязь между электромагнитным, пусковым, демпфирующим моментами электропривода, скоростью, перемещением и параметрами исполнительного двигателя, источников питания и нагрузки при потенциальной фазовой модуляции. Проведен сравнительный анализ результатов аналитического решения и математического моделирования электропривода в программной среде MATLAB. По итогам анализа сделан вывод о том, что расхождение между рассчитанными токами фаз асинхронного двигателя и результатами математического моделирования электропривода не превышает 2 %. В свою очередь, разница между результатами расчета и математического моделирования для электромагнитного момента и перемещения подвижного элемента электропривода не превышает 3 и 6 % соответственно. Таким образом, высокая сходимость расчетных данных с результатами моделирования позволяет говорить о правомочности применения разработанной методики для определения выходных параметров асинхронных электроприводов с пульсирующим законом движения.

Ключевые слова: радиолокационная станция, фазовая модуляция, пульсирующий режим работы, асинхронный двухфазный электродвигатель, электропривод антенны.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 97–103

CONTROLLING TWO-PHASE ASYNCHRONOUS DRIVE OF RADAR ANTENNA OF SECTOR REVIEW IN PULSATING MOTION MODE

V. O. Nagorniy[1], A. V. Aristov[2*]

[1]SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634041, Russian Federation
[2]National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Av., Tomsk, 634034, Russian Federation
[*]E-mail: parist@sibmail.com

The object of the research is the formation principle of the pulsating movement mode for control of the electric drive of the antenna of the radar station of the sector review based on the phase modulation of power voltages of the two-phase asynchronous engine with interruption of one of them in time points when the electromagnetic moment crosses zero.

The purpose of the given research is to receive the estimated ratios that make it possible to establish connection between the output parameters of the electric drive and parameters of the executive engine, power supplies and loadings in case of the potential phase shift keying.

The authors of the article developed the method of calculation of the electric drive with the pulsating law of movement based on the solution of system of equations in the operating form that are to describe the generalized electrical machine by using Cramer's method concerning currents of phases of the asynchronous engine. Using the received currents of phases of the generalized electrical machine, the electromagnetic moment is calculated. The next step is that the starting and damping components are singled out from the electromagnetic moment. Then the motion equation permitting to connect the received currents with the output parameters of the electric drive is solved. To solve the motion equation concerning the relocation of a mobile element the method of harmonic balance is used.

As a result of researches engineering estimated ratios which permit to establish the correlation between the electromagnetic, starting, damping electric drive moments, speed, relocation and parameters of the executive engine, power supplies and loadings in case of potential phase shift keying are received. In the article the comparative analysis of results of the analytical solution and mathematical simulation of the electric drive is provided in a software environment of MATLAB. On the basis of the performed analysis the authors of the article come to the conclusion that the discrepancy between the currents of the phases of the asynchronous engine received as a result of the calculation and the results of mathematical simulation of the electric drive doesn't exceed 2 %. In turn, the discrepancy between the results of the calculation and the mathematical simulation for the electromagnetic moment and the relocation of a mobile element of the electric drive doesn't exceed 3 % and 6 % respectively. The authors of the research also stress that the high accuracy of convergence of the results of the calculation with the results of the simulation allows us to speak about competency of the application of the received calculation procedure for determining the output parameters of asynchronous electric drives with the pulsating law of movement.

Keywords: radar, phase modulation, pulsed mode, two-phase asynchronous electric motor, electric antenna.

Введение. Известно, что принцип действия радиолокационных станций заключается в облучении радиоволнами объекта и приеме отраженного от него сигнала. Генерируемый станцией электромагнитный импульс излучается антенной в каком-либо направлении. По задержке отраженного сигнала можно вычислить расстояние до объекта, а по положению антенны – направление на него. Ориентацию электромагнитного луча, формируемого антенной, можно изменить поворотом антенны в нужном направлении [1]. Во время работы антенна сканирует окружающее пространство по заданному закону в соответствии с текущим режимом. Согласно блок-схеме радиолокатора (рис. 1) источники питания обеспечивают электроэнергией все его блоки и узлы, устройство контроля управляет приемопередатчиком в соответствии с выбранным на пульте управления режимом работы. Вся получаемая информация отображается индикатором секторного обзора. В состав антенного блока входят два электропривода – азимута и угла места антенны, а также схемы управления ими.

В азимутальном приводе антенны радиолокатора для получения пульсирующего движения антенны обычно используются серийный электродвигатель постоянного тока и специальный редуктор [2]. Однако наличие редуктора вносит дополнительную погрешность в определение направления на объект и существенно снижает частоту сканирования.

Уменьшить данные недостатки и существенно расширить динамический диапазон работы можно с помощью привода, построенного на базе двухфазного асинхронного электродвигателя (АД), действующего непосредственно в режиме периодического движения за счет фазной модуляции питающих напряжений с прерыванием одного из них тогда, когда электромагнитный момент АД переходит через ноль [3].

Электроприводами периодического движения в разное время занимались как российские, так и зарубежные ученые. Большой вклад в эту область внесли В. И. Луковников [4], Б. А. Ивоботенко [5], С. А. Грачев [6; 7], Со Лин Аунг [8], С. А. Ткалич, Ф. А. Мамедов, М. Г. Чиликин, В. Я. Беспалов, В. А. Постников, А. П. Балкова, P. J. Lawrenson, M. R. Harris. Однако в их трудах не рассматривался пульсирующий режим работы асинхронного электропривода при потенциальной фазовой модуляции.

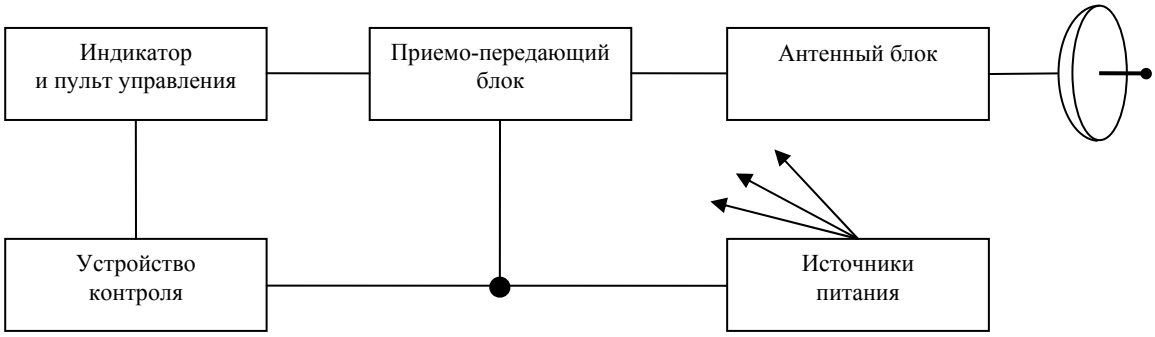


Рис. 1. Блок-схема радиолокационной станции секторного обзора

Теоретическая часть. При исследовании периодических режимов удобно представить электрическую машину в виде некой идеализированной обобщенной модели с двумя парами взаимоперпендикулярных обмоток – на первичном и вторичном элементах [9], что позволяет при определенных допущениях проанализировать наибольшее число различных типов АД, работающих в режиме пульсирующего движения.

Для данной модели возможны несколько вариантов записи системы описывающих ее дифференциальных уравнений. Наиболее просто анализируются уравнения, записанные в координатных осях α, β или *d*, *q*, жестко связанных со статором или ротором соответственно. Так, например, приведение к осям α, β позволяет существенно упростить математическое описание процессов, исключив периодические коэффициенты в уравнениях, описывающих электрическое состояние в статорных обмотках АД.

При общепринятых допущениях (магнитопровод машины не насыщен, магнитные потоки синусоидально распределены в пространстве, вихревые токи и краевые эффекты пренебрежимо малы) [10] модель обобщенного электродвигателя, работающего в режиме пульсирующего движения, в системе координат α, β описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\left.\begin{aligned}
&U_{\alpha s}(t)=i_{\alpha s}R_{\alpha s}+L_{\alpha s}\frac{di_{\alpha s}}{dt}+M_{\alpha}\frac{di_{\alpha r}}{dt};\\
&U_{\beta s}(t)=i_{\beta s}R_{\beta s}+L_{\beta s}\frac{di_{\beta s}}{dt}+M_{\beta}\frac{di_{\beta r}}{dt};\\
&0=i_{\alpha r}R_r+L_r\frac{di_{\alpha r}}{dt}+\\
&+M_{\alpha}\frac{di_{\alpha s}}{dt}-\omega\left(M_{\beta}i_{\beta s}+L_r i_{\beta r}\right);\\
&0=i_{\beta r}R_r+L_r\frac{di_{\beta r}}{dt}+M_{\beta}\frac{di_{\beta s}}{dt}+\\
&+\omega\left(M_{\alpha}i_{\alpha s}+L_r i_{\alpha r}\right);\\
&M_{\text{эм}}=k_{\text{д}}\left(M_{\alpha}i_{\alpha s}i_{\beta r}-M_{\beta}i_{\beta s}i_{\alpha r}\right)=\\
&=M_{\text{н}}\left(\int\omega dt,\omega,\frac{d\omega}{dt}\right),
\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

где $U_{\alpha s}(t)$, $U_{\beta s}(t)$, $i_{\alpha s}$, $i_{\beta s}$, $i_{\alpha r}$, $i_{\beta r}$ – напряжения и токи фазных обмоток; $R_{\alpha s}$, $R_{\beta s}$, R_r, $L_{\alpha s}$, $L_{\beta s}$, L_r – активные сопротивления и полные индуктивности фазных обмоток; M_{α}, M_{β} – взаимоиндуктивности между статорными и роторными обмотками по координатным осям α, β; ω – скорость изменения обобщенной координаты подвижного элемента; $M_{\text{эм}}$, $M_{\text{н}}$ – обобщенные электромагнитное усилие и нагрузка; $k_{\text{д}}$ – обобщенный силовой коэффициент.

Для угловых движений $k_{\text{д}} = 1$, а для прямолинейных $k_{\text{д}} = \pi^2/\tau^2$; где τ – полюсное деление.

При реализации пульсирующего режима работы АД может быть использован в качестве управляемого источника пульсирующего перемещения или усилия в зависимости от того, осуществляется ли питание его обмоток от источника напряжения или тока [11].

Так, при потенциальном питании АД можно в системе уравнений (1) считать заданными фазные напряжения и неизвестным закон движения подвижного элемента двигателя, а при токовом питании – фазные токи и, соответственно, развиваемое двигателем электромагнитное усилие. Для азимутального привода антенны основным выходным параметром является закон движения, поэтому рассмотрим работу АД только при потенциальной модуляции фазных напряжений.

Очевидно, что система (1) является системой дифференциальных уравнений с нелинейными коэффициентами, точное аналитическое решение которой найти невозможно. Однако если частота пульсаций вала исполнительного двигателя Ω не менее чем на порядок меньше циклической частоты питающей сети $\omega_{\text{с}}$ ($\Omega << \omega_{\text{с}}$), то можно считать в первых четырех уравнениях системы ω = const [7]. При этом уравнения становятся линейными, и аналитическое решение для токов при установившемся режиме работы можно найти, применяя теорему разложения [12] с учетом характеристических корней функций регулирования:

$$i_n(t)=\\=\sum_{l=1}^{4}\sum_{h=1}^{m}\frac{q_l(p_h)a_{ln}(p_h)e^{p_h t}}{\left(Q_l'(p_h)\det\left(A(p_h)\right)+\det'\left(A(p_h)\right)Q_l(a_n)\right)},\quad(2)$$

где *n* принимает значения 1, 2, 3, 4; $i_1(t) = i_{\alpha s}(t)$, $i_2(t) = i_{\beta s}(t)$, $i_3(t) = i_{\alpha r}(t)$, $i_4(t) = i_{\beta r}(t)$ – фазные токи; $q_l(P)$, $Q_l(P)$ – операторные полиномы *s*-й и *m*-й степени питающих фазных напряжений $U_l(P) = q_l(P)/Q_l(P)$, причем $m > s$; a_{ln} – минор *l*-го элемента *n*-го столбца операторного определителя первых четырех уравнений системы (1); det(*A*) – детерминант системы (1); p_h – корни полиномов $Q_l(P)$, det(*A*).

Система уравнений (2) позволяет путем простой подстановки возмущающего воздействия и параметров электрической машины определить фазные токи АД для различных частных случаев.

Пятое уравнение системы (1) – уравнение пульсирующего движения вторичного элемента АД – представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка. Обобщенная нагрузка на валу двигателя является здесь сложной функцией параметров нагрузки привода и его движения.

Наиболее часто на практике нагрузка электропривода антенны радиолокатора является совокупностью позиционных и инерционных сил, а также сил жидкостного и сухого трения:

$$M_{\text{н}}=L_{\text{мех}}\frac{d^2\chi}{dt}+R_{\text{мех}}\frac{d\chi}{dt}+C_{\text{мех}}\chi+M_{\text{тр}},$$

где $L_{\text{мех}}$ – коэффициент инерционной составляющей; $R_{\text{мех}}$ – коэффициент демпфирующей (жидкое трение) составляющей; $C_{\text{мех}}$ – коэффициент позиционной составляющей; $M_{\text{тр}}$ – коэффициент трения.

Пренебрегая составляющей сухого трения, которая может быть учтена, при необходимости, согласно

исследованию [13] и с учетом системы (1) уравнение движения привода можно записать как

$$L_{\text{мех}}\frac{d^2\chi}{dt^2}+R_{\text{мех}}\frac{d\chi}{dt}+C_{\text{мех}}\chi=k_{\text{д}}\left(M_{\alpha}i_{\alpha s}i_{\beta r}+\text{M}_{\beta}i_{\beta s}i_{\alpha r}\right),\quad(3)$$

где $\chi=\int\omega dt$ – обобщенная координата положения подвижного элемента.

Решение уравнения (3) можно найти, если разложить его правую часть в ряд Маклорена по степеням угловой скорости ω в окрестности точки ω = 0.

Ограничиваясь первыми двумя членами ряда Маклорена из-за его сильной сходимости [11], уравнение (3) преобразуем к виду

$$L_{\text{мех}}\frac{d^2\chi}{dt^2}+R_{\text{мех}}\frac{d\chi}{dt}+C_{\text{мех}}\chi=M_{\text{эм}}\left(0\right)+F_{\text{демп}}\omega,\quad(4)$$

где $M_{\text{эм}}(0)=\text{M}_{\text{п}}$, $F_{\text{демп}}\omega=\text{M}_{\text{демп}}$ – пусковая и демпфирующая составляющие электромагнитного момента соответственно.

Определив из системы уравнений (2) значения фазных токов и их производных и подставив найденные значения в уравнение (4), искомый закон движения подвижного элемента АД можно найти методом гармонического баланса [14].

Так, при фазовой потенциальной модуляции обмотки первичного элемента двигателя подключаются к источникам напряжений, аналитические выражения для которых в общем случае имеют вид

$$U_{\alpha s}\left(t\right)=U_{m1}\cos\left(\omega_1 t\right)\left(\frac{1}{2}+\frac{2}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin\left(\left(2k-1\right)\omega t\right)}{2k-1}\right),$$

$$U_{\beta s}\left(t\right)=U_{m2}\sin\left(\omega_2 t+\gamma\right),$$

где U_{m1}, U_{m2}, ω_1, ω_2, γ – амплитуды, угловые частоты и фазовый сдвиг питающих напряжений.

Тогда в соответствии с изложенной методикой решение первых четырех уравнений системы дифференциальных уравнений (1) во временной форме можно записать как

$$i_n\left(t\right)=U_{m1}\left(T_{1n}\sin\left(\omega_1 t+\delta_{1n}\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\begin{pmatrix}T_{2nk}\sin\left(\left(\left(2k-1\right)\Omega-\omega_1\right)t+\delta_{2nk}\right)+\\+T_{3nk}\sin\left(\left(\left(2k-1\right)\Omega+\omega_1\right)t+\delta_{3nk}\right)\end{pmatrix}\right)+\quad(5)$$
$$+U_{m2}T_{4n}\sin\left(\omega_2 t+\gamma+\delta_{4n}\right),$$

где T_{1n}, T_{2nk}, T_{3nk}, T_{4n} и δ_{1n}, δ_{2nk}, δ_{3nk}, δ_{4n} – амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих токов, определяемые параметрами электрической машины и функциями регулирования.

С учетом формулы (5) и $\Omega=\omega_1-\omega_2$ при ω = 0 пусковой момент АД в режиме пульсирующего движения запишется как

$$M_{\text{п}}=k_{\text{д}}\left(M_{\alpha}i_{\alpha s}i_{\beta r}-M_{\beta}i_{\beta s}i_{\alpha r}\right)=$$
$$=k_{\text{д}}\left(\begin{array}{l}M_{\alpha}\left(\begin{array}{l}O_1\left(\cos\left(\Omega t-\gamma+\lambda_1\right)-\cos\left(\left(\omega_1+\omega_2\right)t+\gamma+\lambda_2\right)\right)+\\+\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\begin{pmatrix}O_{2k}\left(\cos\left(\left(\left(2k-1\right)\Omega-\omega_1-\omega_2\right)t-\gamma+\lambda_{3k}\right)-\cos\left(\left(2k-2\right)\Omega t+\gamma+\lambda_{4k}\right)\right)+\\+O_{3k}\left(\cos\left(2k\Omega t-\gamma+\lambda_{5k}\right)-\cos\left(\left(\left(2k-1\right)\Omega+\omega_1+\omega_2\right)t+\gamma+\lambda_{6k}\right)\right)\end{pmatrix}\end{array}\right)-\\-M_{\beta}\left(\begin{array}{l}O_4\left(\cos\left(\Omega t-\gamma+\lambda_7\right)-\cos\left(\left(\omega_1+\omega_2\right)t+\gamma+\lambda_8\right)\right)+\\+\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\begin{pmatrix}O_{5k}\left(\cos\left(\left(-\left(2k-1\right)\Omega+\omega_1+\omega_2\right)t+\gamma+\lambda_{9k}\right)-\cos\left(\left(2k-2\right)\Omega t+\gamma+\lambda_{10k}\right)\right)+\\+O_{6k}\left(\cos\left(2k\Omega t-\gamma+\lambda_{11k}\right)-\cos\left(\left(\left(2k-1\right)\Omega+\omega_1+\omega_2\right)t+\gamma+\lambda_{12k}\right)\right)\end{pmatrix}\end{array}\right)\end{array}\right),\quad(6)$$

где O_1, O_{2k}, O_{3k}, O_4, O_{5k}, O_{6k} и λ_1, λ_2, λ_{3k}, λ_{4k}, λ_{5k}, λ_{6k}, λ_7, λ_8, λ_{9k}, λ_{10k}, λ_{11k}, λ_{12k} – амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих пускового момента, зависящие от параметров электрической машины и питающих напряжений.

Так как для высокочастотных составляющих пускового момента электрическая машина является естественным фильтром нижних частот, то в дальнейшем для нахождения закона движения $\chi(t)$ в выражении (6) достаточно учесть только низкочастотные составляющие, кратные частоте Ω. Тогда после тригонометрических преобразований получим

$$M_{\text{п}}=N_1\cos\left(\Omega t+\gamma+\varphi_1\right)+$$
$$+\sum_{k=1}^{\infty}\begin{pmatrix}N_{2k}\cos\left(\left(2k-2\right)\Omega t+\gamma+\varphi_{2k}\right)+\\+N_{3k}\cos\left(2k\Omega t+\gamma+\varphi_{3k}\right)\end{pmatrix},$$

где N_1, N_{2k}, N_{3k} – коэффициенты, зависящие от параметров электрической машины и питающих напряжений; φ_1, φ_{2k}, φ_{3k} – начальные фазы низкочастотных составляющих пускового момента.

Для определения демпфирующего момента необходимо найти первые производные токов по угловой скорости ω:

$$M_{\text{демп}}=k_{\text{д}}\omega\left(M_{\alpha}\left(i'_{\alpha s}i_{\beta r}+i_{\alpha s}i'_{\beta r}\right)-M_{\beta}\left(i'_{\beta s}i_{\alpha r}+i_{\beta s}i'_{\alpha r}\right)\right).$$

Он так же, как и пусковой момент, содержит гармонические составляющие, кратные циклическим

частотам питающей сети ω_1, ω_2 и частоте пульсаций Ω. Однако с учетом того, что весовой вклад периодических составляющих в общее значение демпфирующего момента не превышает 3 % [15], с достаточной степенью точности он может быть представлен только своей постоянной составляющей:

$$M_{\text{демп}} = k_{\text{д}}\omega\begin{pmatrix} M_{\alpha}\left(P_1\cos(\delta_1)+P_2\cos(\delta_2)\right)- \\ -M_{\beta}\left(P_3\cos(\delta_3)+P_4\cos(\delta_4)\right)\end{pmatrix},$$

где P_1, P_2, P_3, P_4 и δ_1, δ_2, δ_3, δ_4 – коэффициенты и начальные фазы составляющих демпфирующего момента.

Тогда уравнение движения принимает вид

$$L_{\text{мех}}\frac{d^2\chi}{dt^2}+\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)\frac{d\chi}{dt}+C_{\text{мех}}\chi = M_{\text{п}}, \qquad (7)$$

и его решение запишется как

$$\chi(t)=\chi_1\sin(\Omega t+\alpha_1)+$$
$$+\sum_{h=1}^{\infty}\chi_{2k}\sin\left((2k-2)\Omega t+\alpha_{2k}\right)+\chi_{3k}\sin(2k\Omega t+\alpha_{3k}),$$

где χ_1, χ_{2k}, χ_{3k}, α_1, α_{2k}, α_{3k} – амплитудные значения и начальные фазы гармонических составляющих закона движения подвижного элемента АД.

В свою очередь, амплитудные значения

$$\chi_1=\sqrt{\chi_{11}^2+\chi_{12}^2}, \qquad \chi_{2k}=\sqrt{\chi_{21k}^2+\chi_{22k}^2},$$
$$\chi_{3k}=\sqrt{\chi_{31k}^2+\chi_{32k}^2},$$

где

$$\chi_{11}=\frac{N_{11}\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}\Omega^2\right)-N_{12}\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)\Omega}{\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}\Omega^2\right)^2+\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)^2\Omega^2},$$

$$\chi_{12}=\frac{N_{12}\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}\Omega^2\right)+N_{11}\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)\Omega}{\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}\Omega^2\right)^2+\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)^2\Omega^2},$$

$$\chi_{21k}=\frac{N_{21k}\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2\right)-}{\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2\right)^2+}$$
$$\frac{-N_{22k}\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)(2k-2)\Omega}{+\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)^2(2k-2)^2\Omega^2},$$

$$\chi_{22k}=\frac{N_{22k}\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2\right)+}{\left(C_{\text{мех}}-L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2\right)^2+}$$
$$\frac{+N_{21k}\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)(2k-2)\Omega}{+\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)^2(2k-2)^2\Omega^2},$$

$$\chi_{31k}=\frac{N_{31k}\left(C_{\text{мех}}-4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2\right)-}{\left(C_{\text{мех}}-4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2\right)^2+}$$
$$\frac{-2N_{32k}\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)k\Omega}{+4\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)^2k^2\Omega^2},$$

$$\chi_{32k}=\frac{N_{32k}\left(C_{\text{мех}}-4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2\right)+}{\left(C_{\text{мех}}-4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2\right)^2+}$$
$$\frac{+2N_{31k}\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)k\Omega}{+4\left(R_{\text{мех}}-F_{\text{демп}}\right)^2k^2\Omega^2},$$

а начальные фазы соответственно

$$\alpha_1=\operatorname{arctg}\frac{\chi_{11}}{\chi_{12}}, \quad \alpha_{2k}=\operatorname{arctg}\frac{\chi_{21k}}{\chi_{22k}}, \quad \alpha_{3k}=\operatorname{arctg}\frac{\chi_{31k}}{\chi_{32k}},$$

где

$$N_{11}=N_1\sin\varphi_1;\ N_{21k}=N_{2k}\sin\varphi_{2k};\ N_{31k}=N_{3k}\sin\varphi_{3k};$$
$$N_{12}=N_1\cos\varphi_1;\ N_{22k}=N_{2k}\cos\varphi_{2k};\ N_{32k}=N_{3k}\cos\varphi_{3k}.$$

Результаты сравнительного анализа. С целью проверки методики расчета и правильности полученных инженерных соотношений проведена их сравнительная оценка с результатами математического моделирования электропривода, выполненного на базе асинхронного двигателя АИР71А2 в программной среде MATLAB [16] (см. таблицу).

В качестве примера представлены токи обмотки статора АД (рис. 2), найденные согласно выражению (5) (кривая *1*) и в результате математического моделирования (кривая *2*), а также законы изменения электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и координаты положения подвижного элемента привода $\chi(t)$ (рис. 3). Как видно, максимальное расхождение результатов не превышает 3 и 6 % соответственно, что говорит о правомочности применения методики расчета для определения выходных параметров асинхронных электроприводов с пульсирующим режимом работы.

Параметры исполнительного двигателя

Мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	КПД	cos φ	Кратность пускового тока	Кратность максимального момента	Кратность пускового момента
0,75	2810	220	2	71	0,8	4,4	2,4	2,3

Момент инерции, кг·м^2	Число пар полюсов	Сопротивление взаимоиндуктивности, Ом	Активное сопротивление обмотки статора, Ом	Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	Сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом	Сопротивление рассеяния обмотки ротора, Ом
$2{,}1\cdot10^{-3}$	1	149,035	9,195	8,564	10,218	13,143

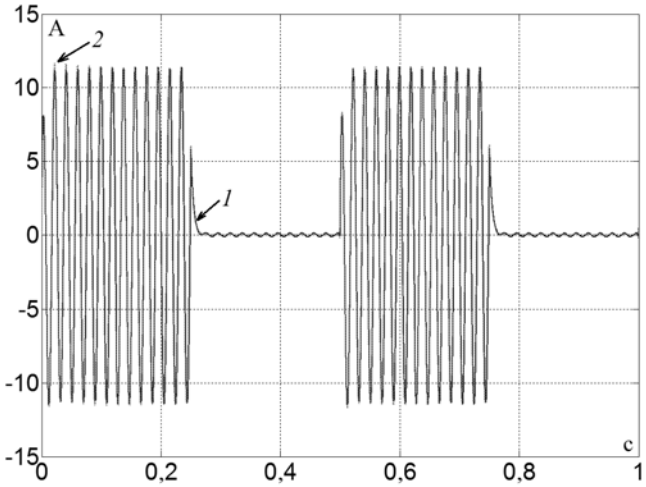


Рис. 2. Ток фазы $i_{as}(t)$ асинхронного двигателя: *1* – результаты аналитического расчета; *2* – результаты математического моделирования

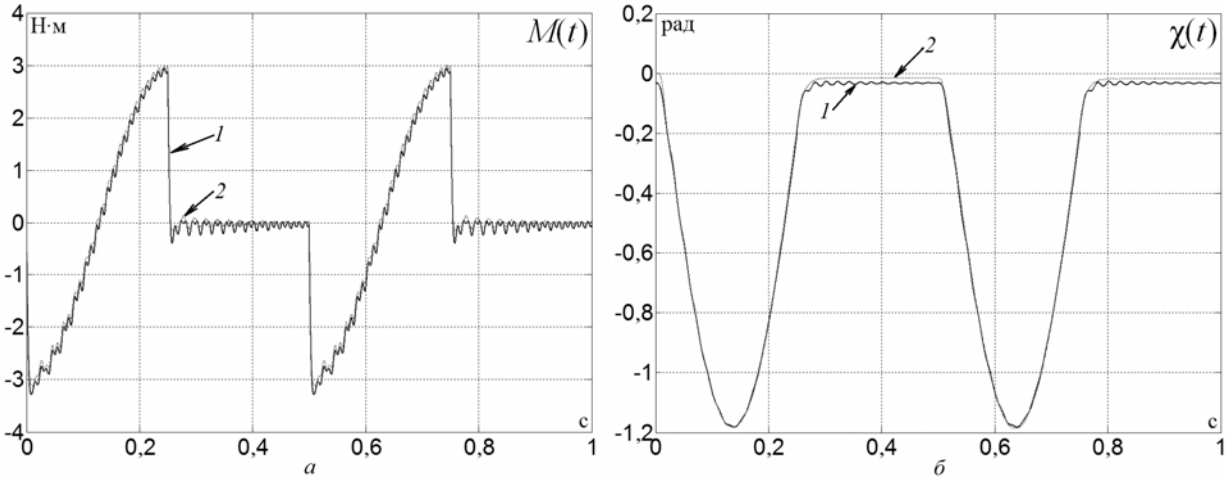


Рис. 3. Законы изменения: *а* – электромагнитного момента $M_{эм}(t)$; *б* – координаты подвижного элемента привода $\chi(t)$; *1* – результаты аналитического расчета; *2* – результаты математического моделирования

Заключение. Полученные выражения являются теоретической основой для расчета и исследования электроприводов, работающих в режиме пульсирующего движения, и могут быть рекомендованы к применению при их разработке и анализе.

Библиографические ссылки

1. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering : handbook. Washington : Naval Air Warfare Center, 1999. 299 P.

2. Пат. 2089988 Российская Федерация, МПК H 02 K 7/00. Электропривод / Горелик Э. А., Жуковский Ю. В., Литвинов Б. В., Тув А. М., Хомяков В. В. Заявл. 07.03.95 ; опубл. 10.09. 97.

3. Аристов А. В. Электропривод колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Изв. Том. политехн. ун-та. Энергетика. 2008. Т. 313, № 4. С. 107–109.

4. Луковников В. И. Электропривод колебательного движения. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

5. Ивоботенко Б. А., Казаченко В. Ф. Проектирование шагового электропривода. М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1985. 100 с.

6. Грачев С. А., Луковников В. И. Безредукторный электромашинный привод периодического движения. Минск : Высш. шк., 1991. 160 с.

7. Грачев С. А. Исследование динамики специальных режимов работы асинхронных электродвигателей : автореф. дис. … канд. техн. наук. Томск, 1975. 18 с.

8. Со Лин Аунг. Исследование и разработка автоматических устройств управления замкнутыми шаговыми электроприводами с внутришаговой дискретной коррекцией скорости : автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 2008. 28 с.

9. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии. М. : Энергия, 1973. 400 с.

10. Громов А. К., Ершов А. Г., Лихачева А. В. Электромеханическое преобразование энергии: Данные и программа : учеб. пособие. Иваново, 2008. 1 электрон. опт. диск (CD RW).

11. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. М. : Энергия, 1974. 168 с.

12. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов: в 2 т. 5-е изд. СПб. : Питер, 2009. 512 с.

13. Луковников В. И., Веппер Л. В. Исследование автоколебательного движения однофазного асинхронного электродвигателя с линейной пружиной на валу // Вестник Гом. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2001. № 2(5). С. 33–42.

14. Аристов А. В. Разработка и исследование прецизионного электропривода угловых синусоидальных колебаний : автореф. дис. … канд. техн. наук. Томск, 1982. 18 с.

15. Аристов А. В. Влияние преобразователя частоты на координатную точность электропривода // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники 2008. № 2 (18), ч. 2. С. 161–165.

16. MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing. URL: http://www.mathworks.com/ (дата обращения: 31.10.2014).

References

1. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering: handbook. Washington, Naval Air Warfare Center, 1999, 299 p.

2. Gorelik E. A., Zhukovsky U. V., Litvinov B. V., Tuv A. M., Khomyakov V. V. *Elektroprivod* [Electric Drive]. Patent RF, no. 2089988, 1997.

3. Aristov A. V. [Electric drive of an oscillating motion in the mode of discontinuous Relocation]. *Izv. Tom. politekhn. un-ta. Energetika*. 2008, vol. 313, no. 4, p. 107–109 (In Russ.).

4. Lukovnikov V. I. *Elektroprivod kolebatel'nogo dvizheniya.* [Electric drive of an oscillating motion]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 152 p.

5. Ivobotenko B. A., Kazachenko V. F. *Proektirovanie shagovogo elektroprivoda* [Design of the step electric drive]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute (MPEI) Publ., 1985, 100 p.

6. Grachev S. A., Lukovnikov V. I. *Bezreduktornyy elektromashinnyy privod periodicheskogo dvizheniya.* [Gearless dynamoelectric drive of periodic movement]. Minsk, Vysshaya Shkola Publ., 1991, 160 p.

7. Grachyov S. A. *Issledovanie dinamiki spetsial'nykh rezhimov raboty asinkhronnykh elektrodvigateley. Avtoref. Dis. kand. tekhn. nauk.* [Research of dynamics of special operation modes of asynchronous electromotors. Abstract of a thesis in Engineering Science]. Tomsk, 1975, 18 p.

8. So Lin Aung. *Issledovanie i razrabotka avtomaticheskikh ustroystv upravleniya zamknutymi shagovymi elektroprivodami s vnutrishagovoy diskretnoy korrektsiey skorosti. Avtoref. Dis. kand. tekhn. nauk.* [Research and Development of Automatic Devices of Control of Closed Step Electric Drives with Intra Step Discrete Correction of Speed. Abstract of a thesis in Engineering Science]. Moscow, 2008, 28 p.

9. Kopylov I. P. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii.* [Electromechanical transformers of energy]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 400 p.

10. Gromov A. K., Yershov A. G., Likhacheva A. V. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Electromechanical conversion of energy]. Ivanovo, 2008.

11. Brodovsky V. N., Ivanov E. S. *Privody s chastotno-tokovym upravleniem*. [Drives with the frequency and current control]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 168 p.

12. Demirchyan K. S., Neumann L. R., Korovkin N. V. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. [Theoretical bases of electrical engineering]. St.Petersburg, Piter Publ., 2009, 512 p.

13. Lukovnikov V. I., Vepper L. V. [Research of self-oscillatory movement of the single-phase asynchronous electromotor with the linear spring on a shaft]. *Vestnik Gom. gos. tekhn. un-ta im. P.O. Sukhogo*. 2001, no. 2(5), p. 33–42 (In Russ.).

14. Aristov A. V. *Razrabotka i issledovanie pretsizionnogo elektroprivoda uglovykh sinusoidal'nykh kolebaniy. Avtoref. Dis. kand. tekhn. nauk* [Development and research of the precision electric drive of angular sine wave oscillations. Abstract of a thesis in Engineering Science]. Tomsk, 1982, 18 p.

15. Aristov A. V. [Influence of the frequency converter on the coordinate accuracy of electric drive]. *Dokl. Tom. gos. un-ta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 2008, no. 2 (18), part 2, p. 161–165.

16. MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing. Available at: http://www.mathworks.com/ (date of the access: 31.10.2014).

© Нагорный В. О., Аристов А. В., 2015

УДК 517.977.1

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 104–112

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ТРАЕКТОРИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В АТМОСФЕРЕ

А. Н. Рогалев[1*], А. А. Рогалев[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
[2]Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
[*]E-mail: rogalyov@icm.krasn.ru

Основная задача статьи – описать гарантированные методы решения систем дифференциальных уравнений с учетом управляющих воздействий и их применение к задачам оценки предельных отклонений летательных аппаратов. Постановка задач оценки предельных отклонений обусловлена практическими потребностями оценки надежности сложных нелинейных управляемых систем, выполняющих свои функции в условиях возмущений. Примером такой системы является летательный аппарат: самолет, ракета, космический корабль. Среди задач оценки предельных отклонений следует отметить исследование движения самолета на этапе автоматического захода на посадку, где определяется, возможно ли нарушение ограничений, наложенных на кинематические параметры самолета, в момент касания взлетно-посадочной полосы. К таким задачам относится также оценка возможности потери устойчивости движения летательного аппарата на заданном интервале времени. Наибольшие сложности при решении такой задачи возникают в том случае, когда условия полета не являются стационарными, например, при рассмотрении участка спуска в атмосферу орбитальной ступени космического корабля. В этом случае отсутствуют сами критерии потери устойчивости, если не ограничиваться простейшим случаем линейной системы, для которой могут быть использованы условия Рауса–Гурвица. Упрощенным критерием потери устойчивости может служить некоторое пороговое или критическое значение одного из параметров движения самолета, например, угла атаки или угла скольжения.

В подобных задачах важную роль играют множества достижимости – совокупности концов всех траекторий управляемой системы, начинающихся в начальный момент времени в точках начального множества. Эти множества применяются в задачах гарантированного или минимаксного оценивания решений динамических систем, если действующие на систему внешние возмущения и ошибки наблюдения заключены в определенных пределах (стеснены ограничениями).

Анализ работ, выполняющих оценки множеств достижимости, свидетельствует о том, что получить надежную оценку множеств достижимости управляемых систем в условиях неопределенности, если в правые части этих систем управляющие воздействия входят произвольным образом, а не только как аддитивный член, удается не всегда. Поэтому возможности применения гарантированных методов, основанных на символьном представлении решений, для оценки множеств достижимости будут полезными специалистам в управлении.

Представлены результаты применения численных методов, основанных на построении символьных формул решений и оценивании всех возможных ее значений.

Ключевые слова: предельные отклонения траекторий, летательные аппараты, критические значения параметров, гарантированный метод оценивания, символьная формула.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 104–112

NUMERICAL ESTIMATIONS OF MAXIMUM DEVIATIONS FOR AIRCRAFT TRAJECTORIES IN THE ATMOSPHERE

A. N. Rogalyov[1*], A. A. Rogalyov[2]

[1]Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
50/44, Akadmegorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[2]Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies
26, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
[*]E-mail: rogalyov@icm.krasn.ru

In this article we study guaranteed methods for solving differential equations systems with control actions and its application for problems of aircrafts trajectories maximum deviations estimating. The problem statement of maximum deviations estimating is caused by the necessity to evaluate reliability of complex nonlinear controlled systems that

operate under the influence of perturbations. The example of such system is an aircraft: an airplane, a rocket, a spacecraft. We should emphasize the research of an airplane movement during an autoland approach among problems of maximum deviations estimating. This research gives an answer whether a violation of restrictions imposed on the kinematic parameters of an airplane touching down a runway is possible or not. The problems of limit deviations evaluating also include estimating of the possibility of an aircraft motion stability's loss for a given time interval. The greatest difficulty in solving such problems arises in the case when flight conditions are not fixed, for example, when considering the descent into the atmosphere of a spacecraft orbiter. In this case the loss of stability criteria themselves are not formulated, if we do not confine ourselves to the simplest case of a linear system, for which the Routh-Hurwitz conditions can be used. Some threshold or critical value of one of the parameters of an airplane can serve as a simplistic criterion of stability loss. For example, the angle of attack or slip angle can be taken as such parameter.

Reachable sets (collections of all the trajectories of controlled systems) make a figure in such problems. These sets are used in problems of guaranteed or minimax estimation of solutions of dynamical systems if external perturbations that influence on a system and observation errors are enclosed within a certain range (constrained by limitations).

The analysis of works that estimate reachable sets indicates that the reliable estimation of reachable sets of controlled systems under uncertainty, if the right-hand sides of these systems depend nonlinearly on the control actions, is not always possible. Therefore the possibility of the guaranteed methods based on symbolic representation of solutions for reachable sets evaluation will be useful for specialists in control.

The article presents the results of the application of the numerical methods based on the construction of symbolic formulas of solutions and evaluating all of its possible values.

Keywords: maximum deviations, aircraft, critical values of parameters, guaranteed method of estimating, symbolical formula.

Введение. В статье будем основываться на предположении, что неопределенные факторы в математической модели управляемой системы не имеют вероятностного описания, а известны лишь с точностью до множеств, их содержащих. Рассмотрим систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y, u),\ u(t) \in U,\ y(t^0) = y^0, \qquad (1)$$

для которой задано ограниченное по величине управляющее воздействие и поставлены начальные данные. Пусть в задаче (1) f – непрерывно дифференцируемая по y функция ($f(t) \in C^1$), множество U компактно в R^m, выбор возможных реализаций управляющих воздействий $u(\cdot)$ стеснен ограничениями $u(t) \in U, t \in [t^0, t]$, отражающими особенности рассматриваемой задачи. Полагаем также, что:

а) выполняется равномерная оценка $|y(t)| < b$ для всех решений (1) на интервале $t \in [t^0, T]$, где $b = \text{const} > 0$;

б) множество $Y(t) = f(t, y, U)$ для всех y, $t \in [s, T]$ компактно и выпукло.

Множеством достижимости $D(t, t^0, M)$ управляемой системы (1) с начальным условием $y(t^0) = y^0 \in M$ при $t \geq t^0$ называется совокупность концов $y(t)$ всех траекторий этой системы, начинающихся в момент s в точках начального множества M [1–3].

Непрерывность множества достижимости $D(t, t^0, y^0)$, зависящего также от времени, означает следующее: для любого $\varepsilon > 0$ существует $\delta > 0$ такое, что хаусдорфова метрика между множествами значений решений в моменты времени t^1, t^2 становится меньше ε:

$$d(D(t^1, t^0, y^0), D(t^2, t^0, y^0)) < \varepsilon,$$

$$\left|t^1 - t^2\right| < \delta, t^1, t^2 \in [t^0, T]. \qquad (2)$$

Множества достижимости играют важную роль в теории управляемых систем. На языке теории множеств достижимости можно сформулировать и решать многие основные задачи теории управления [1–9]. К подобным задачам относятся задачи проверки гарантированных условий безопасности и задачи построения «выживающих» траекторий. Условие «выживаемости» означает проверку выполнения условий $y(t) \in N$ при $t^0 \leq t < T$ для любого движения $y(\cdot)$, исходящего из точек области допустимых начальных позиций Y^0, и заданном множестве N при переборе всех управляющих воздействий, удовлетворяющих ограничению $u(\cdot) \in Q$. Рассмотрим управляемую динамическую систему общего вида, подверженную к тому же действию неопределенных факторов. Тогда движение состояния такой системы подчиняется следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y, u, v), \qquad (3)$$

где $u = u(t)$ – управляющее воздействие; $v = v(t)$ – неконтролируемое воздействие.

Вообще говоря, величины векторов управлений и возмущений (допустимых управлений и возмущений) могут быть сложным образом связаны с движением динамической системы. Мы будем рассматривать лишь случай геометрических ограничений, имеющих вид

$$u \in U(t, x),\ v \in V(t, x).$$

Таким образом, возможные значения векторов управлений и возмущений зависят от текущего момента времени и состояния системы. Часто мы не нуждаемся в полном определении траектории динамической системы, а разыскиваем только положение

системы в определенный момент T. Например, зная множества достижимости $D(t,s,M)$ управляемой системы, можно установить возможности управления, т. е. определить, можно ли привести управляемую систему в заданное фазовое состояние $y_{\text{финал}}$ в некоторый фиксированный момент времени $T > s$. Для этого достаточно проверить, имеет ли место включение $y_{\text{финал}} \in D(T,s,M)$, т. е. принадлежит ли вектор $y_{\text{финал}}$ множеству $D(T,s,M)$.

Более общая задача состоит в приведении исследуемой управляемой системы в заданный момент T на заданное множество N в фазовом пространстве. Эта задача, очевидно, разрешима в том и только том случае, если множества N, $D(T,s,M)$ имеют общую точку, т. е. если их пересечение непусто:

$$N \cap D(T,s,M) \neq \varnothing. \quad (4)$$

Располагая множествами достижимости, можно проследить, как зависит разрешимость рассматриваемых задач от начального множества *M*, от времени *T*, от множества N и т. д. Отметим, что подобные задачи часто возникают на практике, например, при оценке маневренных возможностей летательных аппаратов (ЛА) [10]. Выбрав траекторию, можно проверить, выполняются ли некоторые интересующие нас свойства. Одним из таких свойств является безопасность объекта. Говорят, что траектория $y(t)$ безопасна, если она не пересекается с «опасным» множеством F:

$$\forall t \geq 0,\ \mathrm{y}(t) \notin F.$$

Множество F – это подобласть пространства состояний, в которую мы не хотим попасть. В качестве примера таких областей мы приведем требование для самолета не лететь ниже скорости его сваливания, а также анализ процесса автоматической посадки самолета, в первую очередь сводящийся к оценке возможных значений параметров траекторного и углового движения самолета в момент касания шасси взлетно-посадочной полосы (ВПП) (рис. 1). Главными из этих ограничений являются: в продольном движении – на дальность точки касания $\left(L_{\min} < L < L_{\max}\right)$, на вертикальную скорость в точке касания $\left(\left|V_y\right| < V_{y,\max}\right)$, на горизонтальную скорость $\left(V_x < V_{x,\max}\right)$, на угол тангажа $\left(\vartheta_{\min} < \vartheta < \vartheta_{\max}\right)$; в боковом движении – на боковое смещение от осевой линии $\left(\left|Z\right| < Z_{\max}\right)$, на боковую скорость $\left(\left|V_z\right| < V_{z,\max}\right)$, на угол крена $\left(\left|\gamma\right| < \gamma_{\max}\right)$ и угол рыскания $\left(\left|\psi\right| < \psi_{\max}\right)$.

В большинстве из таких задач требуется оценить максимальное значение одного из параметров не в фиксированный момент времени, а на определенном интервале времени полета. При этом полет ЛА происходит в условиях воздействия различных влияющих, в том числе друг на друга, возмущений: отклонений инерционных и аэродинамических параметров ЛА, атмосферных возмущений, инструментальных ошибок, отказов и т. п. Задачи такого типа в [10] называют задачами о выбросах случайного процесса.

Существует два подхода к решению задач, учитывающих предельные значения или предельные реализации. Первый подход основан на выборе случайного характера возмущений и является, по-видимому, самым широко распространенным [10]. Второй подход – гарантированный подход – предполагает, что возмущения, хотя и являются случайными, представляют собой набор конечного числа случайных параметров, для значений которых поставлены вполне определенные ограничения, и пусть заранее известно, что зависимости выходных параметров от любого из упомянутых параметров являются монотонными. Тогда выходные параметры принимают свои экстремальные значения при сочетаниях граничных значений случайных параметров определенного знака. Для всех экстремальных значений следует проверить эти сочетания и вычислить соответствующие значения выходных параметров. Если окажется, что выходные параметры не выходят за допустимые пределы, то выполнение всех ограничений можно считать гарантированным. Гарантированный подход, вероятно, может быть полностью обоснован в том случае, когда возмущениями являются систематические инструментальные ошибки, а используемые бортовые (и наземные) приборы прошли предварительную проверку и тарировку. Тогда с достаточным основанием можно считать, что ошибка в показаниях того или иного прибора не превосходит допустимых пределов. При этом закон распределения некоторой инструментальной ошибки $\Delta\varepsilon$ может сильно отличаться от гауссовского закона, если в процессе доводки прибора ошибка «вставлена» внутри разрешенного диапазона. В этом случае распределение ошибки оказывается ограниченным и может иметь пики в окрестностях предельных значений (рис. 2).

Статья рассматривает вопросы применения методов, основанных на символьных формулах решений, для вычисления гарантированных границ множеств достижимости и применение этих границ для оценки предельных отклонений траекторий ЛА. Гарантированное оценивание множества достижимости основано на вычислении границ множества $Y(t) = \bigcup_{y^0 \in Y^0} y(t, y^0)$. Для вычисления границ (включений множеств достижимости) строятся символьные формулы, аппроксимирующие оператор сдвига вдоль траектории системы дифференциальных уравнений, и вычисляются множества значений по этим формулам.

Многие вопросы, касающиеся свойств класса гарантированных методов, описаны в работах [11–21]. В данной статье включены новые дополнительные варианты конструирования зависимостей между значениями решений управляемых систем и их начальными значениями, а также управляющими параметрами этих систем. Первый вариант определения границ решений использует коэффициенты чувствительности решений по начальным данным или параметрам задачи как решения дифференциальных уравнений чувствительности. Второй вариант для определения границ вводит символические образы динамических систем, позволяющие строить глобальную структуру решений дифференциальных уравнений, проводить качественный анализ решений и вычислять необходимые динамические характеристики задачи.

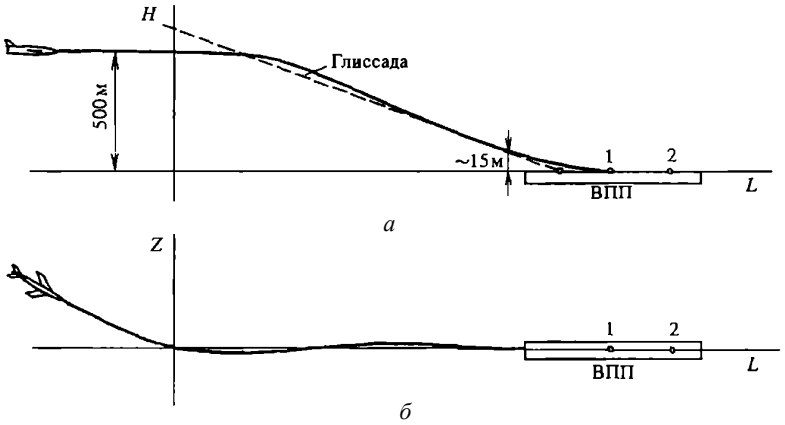


Рис. 1. Общая схема выполнения автоматической посадки самолета в проекции: *а* – на плоскость HL: H – высота (расстояние по вертикали до ВПП), L – дальность точки касания; *б* – на плоскость ZL: Z – боковое смещение от осевой линии, L – дальность точки касания; *1* – точка касания ВПП, *2* – точка остановки

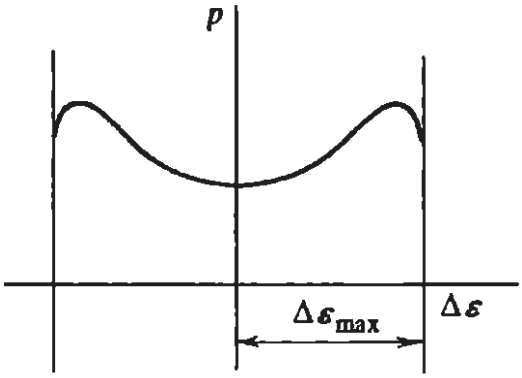


Рис. 2. Распределение инструментальных ошибок в приборах после тарировок

Символический анализ [22] основан на построении символического образа динамической системы, который является ориентированным графом. Допустимый путь на графе – последовательность узлов (символов) – является аналогом траектории динамической системы. Пространство допустимых путей отражает динамику системы.

Гарантированные методы оценки множеств решений ОДУ. Символьная формула (аналитическое выражение) – запись имен переменных и совокупности действий, которые нужно проделать в определенном порядке над значениями этих переменных. В дальнейшем при записи символьных формул, аппроксимирующих оператор сдвига вдоль траектории, допускается включение в них числовых констант с отложенным выполнением арифметических действий над ними.

Пусть K_i – последовательность нормированных пространств, зависящих от параметра *u*, принадлежащего множеству *U*; Y^i, $i = 1,...,n-1$ – последовательность символьных формул непрерывных отображений F^i, определенных на прямом произведении $K_1 \cdot K_2 \ldots K_n$, которые отображают это произведение в пространство K_{n+1} и задают зависимость между значениями решения в каждой точке области определения и начальными значениями решения. Результат последовательного исполнения преобразований формул

$$\begin{aligned}
&Y^1 = F^1(t^0, t^1, Y^0, Y^1) = S^1(Y^0),\\
&Y^2 = F^2(t^0, t^1, t^2, Y^0, Y^1, Y^2) = S^2(Y^0) \circ S^1(Y^0),\\
&Y^i = F^i(t^0, \ldots, t^i, Y^0, Y^1, \ldots, Y^i) = S^i(Y^0) \circ \ldots \circ\\
&\circ S^2(Y^{i-1}) \circ S^1(Y^i), \qquad (5)\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&Y^m = F^m(t^0, \ldots, t^m, Y^0, Y^1, \ldots Y^m) = S^m(Y^0) \circ \ldots \circ\\
&\circ S^2(Y^{i-1}) \circ S^1(Y^i)
\end{aligned}$$

будет называться символьной формулой (опорной траекторией) метода, заданной сдвигом вдоль траектории ОДУ.

Можно привести следующие примеры подобных символьных формул:

$$y^m = y^{m-1} + \varphi(h, y^{m-1}),$$

$$y^m = y^{m-1} + \varphi(h, y^m, y^{m-1}).$$

В рассматриваемых задачах управление является измеримой функцией, что не допускает применения методов рядов Тейлора [23] для построения опорных траекторий.

Включение в правую часть управляемой системы управления u, принадлежащего произвольному множеству U, позволяет учитывать все управляющие воздействия при построении множеств достижимости управляемых систем.

В силу сказанного представим кратко этапы выполнения гарантированного метода:

1. Начало выполнения алгоритма – инициализация всех переменных, идентифицирующих систему: размерность системы, вид правой части, список переменных, начальные данные.

2. Запись компонент символьных формул решений как векторных функций, состоящих из символьных компонент $s(t^k)$, зависящих от символьных форм начальных данных $y_1^0,...,y_n^0$. Каждая компонента символьного вектора определяется заново в каждой точке t^k как функция, зависящая от символьных начальных данных $y_1^0,...,y_n^0$. Эта формула описывает сдвиг вдоль кривой, аппроксимирующей траекторию решения системы, на каждом шаге. Сдвиг вдоль траектории решений определяется на основе построенных символьных формул решений.

3. Последовательное исполнение метода хранения и переработки символьной информации при продвижении вдоль траектории решений, производящееся на основе статичного хранения этой информации, работы с адресацией памяти с помощью функций поточной обработки.

4. Преобразование символьной формулы приближенного решения к виду, который позволяет эффективно и быстро вычислять оценки областей значений приближенных решений (*S*-решения), соответствующие изменениям параметров задачи. Для этого используется кусочно-полиномиальное представление символьных формул и опорные функции для многозначных функций, описывающих области значений. Символьные формулы не преобразуются на каждом шаге алгоритма, организуется их хранение в памяти, для этого полезным является кусочная полиномиальность. Затем они используются для вычислений областей значений решений, как кратко описано в пункте 3.

5. Представление символьной формулы (вектора с символьными компонентами) Y, аппроксимирующей оператор сдвига вдоль траектории, позволяет определить прообразы экстремальных значений (верхних и нижних границ для множеств решений). Эти прообразы принадлежат вектору начальных значений Y^0 для всех узлов сетки t^k. Для нахождения прообразов применяется одна из форм решения экстремальной задачи. Обозначим найденные точки $y_d^0, d = 1, \ \ldots, \ 2n$. Они служат основой для определения множеств («брусов») решений, включающих все решения из окрестности точек y_d^0.

6. Определение границы глобальной ошибки начинается с применения алгоритма неподвижной точки в форме алгоритмов типа гомотопии [24]. Цели применения алгоритма гомотопии – вычислить области значений (многозначные векторные функции), включающие множества точных решений в областях, содержащих каждую из 2*n*-граничных точек. Вычисленные многозначные функции образуют граничные гиперплоскости для множества решений системы ОДУ, являющиеся гарантированными границами этого множества решений. Эти границы областей всех решений могут быть завышенными, но они позволяют оценивать глобальную ошибку решений, являясь включениями остаточных членов разложений.

7. Гарантированные границы глобальной ошибки множества приближенных решений устанавливаются на основе суммирования оценок локальной ошибки вдоль траектории, заданной символьным решением, причем эти ошибки привязаны к каждому экстремальному значению *S*-решения. Верхняя оценка глобальной ошибки (векторная величина, состоящая из *S*-компонентов) – это результат накопления величин локальных ошибок вдоль траектории решения. Подобная верхняя оценка насчитывается для всех подынтервалов на всем интервале интегрирования и для каждого экстремального значения, ограничивающего *S*-решение. Именно так происходит независимое определение символьных формул решений и процесс суммирования локальных ошибок вдоль траекторий решения.

8. Вычисление границ включений множества приближенных решений поставленной задачи выполняется так: к границам *S*-решений добавляется оценка глобальной ошибки (таких операций объединения будет 2*n*). Эти вычисления значений границ множеств решений отложены на последний этап исполнения алгоритма. Полезно отметить, что для большинства тестовых примеров включение обеспечивается уже для множества *S*-решений, хотя этот факт является эмпирическим.

В итоге, величина $Y(t)$ – это гарантированная оценка множества точных решений с учетом всех видов ошибок. При этом используется тот факт, что построенные символьные формулы решений являются кусочно-полиномиальными функциями, зависящими от $y_1^0, \ ..., y_n^0$. Множество значений приближенных решений является выпуклым и компактным множеством. Его возможно включать в множество, аппроксимировать внешним многогранником, включающим множество решений.

Выполнение преобразований символьных формул – это первый этап гарантированного метода включения решений, за которым следует этап числовых вычислений. Для проведения символьных преобразований в принципе используются системы компьютерной алгебры. Однако подобное использование компьютерной алгебры, как правило, приводит к крайне затратным по времени исполнения алгоритмам, особенно если вычисления производятся в цикле. Поэтому в общем случае для описываемого класса методов предлагается модель вычислений (преобразований и вычислений) символьных формул, основанная на поэтапном статичном хранении информации и преобразовании ее в завершающей стадии метода. В силу

этого модель вычислений (преобразований и вычислений) символьных формул осуществляется без явного выписывания суперпозиций компонент формулы, определяемых на каждом шаге. Связь между этими компонентами определяется посредством задания механизма адресации. Ссылки на адреса различных уровней хранятся в стековой памяти в виде дерева. Генерация кода вычислений по формуле (3) осуществляется в процессе обхода этого дерева, начиная с вершин.

В обозначенном выше алгоритме получения символьных формул

$$\begin{aligned} Y^n &= F^n(t^0,\ldots,t^n,Y^0,Y^1,\ldots,\ Y^n) = \\ &= S^n(Y^0)\circ\ldots\circ S^2(Y^{i-1})\circ S^1(Y^i) \end{aligned} \qquad (6)$$

используется следующая методика обработки последовательности символьных формул. Пусть $\phi(y^0)$ это однозначное отображение единичного интервала из R^1 на гиперкуб из R^n, которое каждой точке $t \in R$ сопоставляет некоторую точку $y = \phi(t)$. При помощи такого отображения можно построить алгоритм исполнения, который для каждой точки $t \in R$ позволяет определить формулу отображения $F(Y_1^0, Y_2^0,\ \ldots, Y_n^0)$ и процесс ее сборки по адресам. Для этого предлагается использовать в качестве отображения $\phi(y^0)$-непрерывное однозначное отображение единичного интервала на *n*-мерный куб, известное как кривая Пеано, заполняющая пространство. Фактически кривая Пеано представляет собой непрерывную, нигде не дифференцируемую кривую, которая проходит через все точки единичного гиперкуба в пространстве R^n. Изобразить кривую Пеано нельзя, возможно лишь дать последовательность кривых, которая в пределе сходится к ней. Каждая такая кривая называется приближением кривой Пеано и имеет номер, определяющий ее номер в последовательности кривых.

Таким образом, *m*-приближение можно рассматривать как некоторую аппроксимацию *m*-функции в рекурсивной формуле (4). 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.

Итогом работы описанного выше алгоритма будет возможность в любой точке t^k построить символьную формулу решения (3) и вычислять на основе этой формулы значения решений.

Применение гарантированных методов в задачах оценки предельных положений

1. Рассматривается модель класса «ракета–самолет» [25], описывающая преследование маневрирующего объекта (преследуемого) другим объектом (преследователем) в экспоненциальной атмосфере по заданному закону сближения под действием силы земного притяжения и силы аэродинамического сопротивления:

$$\begin{aligned} &\frac{dy_1}{dt} = -y_1 y_2 - kgv\frac{u}{y_1}, \\ &\frac{dy_2}{dt} = -Vy_2 u, \\ &\frac{dy_3}{dt} = -y_1\sqrt{1-\left(\frac{Vu}{y_1}\right)^2} + V\sqrt{1-u^2}, \\ &g = 9{,}80665. \end{aligned} \qquad (7)$$

В этой модели используются следующие обозначения: y_1 – функция скорости ракеты, y_2 – функция плотности атмосферы на высоте полета ракеты, y_3 – функция расстояния между ракетой и преследуемым самолетом, движущимся с постоянной скоростью V. Время $t \in [t_s, t_F]$, причем момент времени t_F не задан, коэффициент, присутствующий в экспоненциальном изменении плотности атмосферы, $k = 1{,}079 \cdot 10^{-4}$. Начальное условие $y_1(t_0)$ определяется из условий разрешимости управляемой системы (т. е. в данном случае из условий достижимости ракетой самолета), $y_3(t_0)$ входит в критерий качества управления (минимизируемый функционал). На управление $u(t)$ налагается условие $|u(t)| \le 0{,}985$. Для управляемой системы должны выполняться поточечные фазовые ограничения $y_1(t) \in [\min V,\ 0{,}1]$, $y_2(t) \in [0{,}07,\ 0{,}12]$, $y_3(t) \in [0{,}4]$, $t \in [0, t_F]$. На рис. 3 изображены множества значений скоростей ракеты и расстояния между ракетой и самолетом на множестве допустимых управлений в различные моменты времени, на рис. 4 – граничные значения множества расстояний между ракетой и преследуемым самолетом на множестве допустимых управлений, т. е. оценки предельных значений.

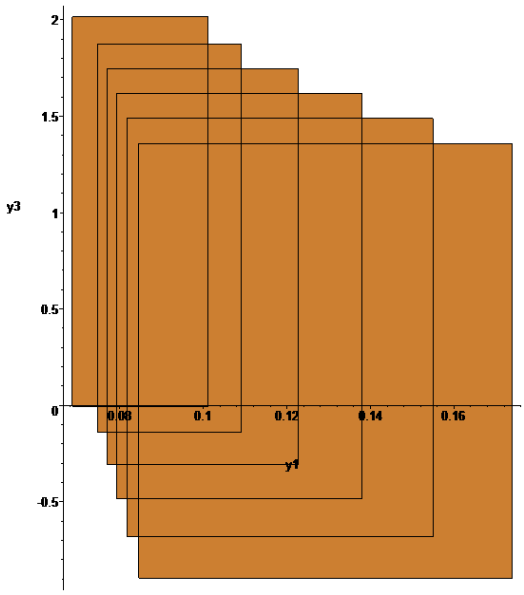


Рис. 3. Границы включения множеств достижимости в фазовой плоскости (относительно функции скорости ракеты и функции расстояния до преследуемого самолета)

2. Рассмотрим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, в правую часть которой входит управляющее воздействие:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= 2y_2 + y_4, \\ \frac{dy_2}{dt} &= -2y_1 + y_3 + u_1(t), \\ \frac{dy_3}{dt} &= y_2 + 10y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} &= 2y_1 - 2y_3 + u_2(t). \end{aligned} \qquad (8)$$

Система (8) – это гамильтонова система, имеющая гамильтониан

$$H = y_1^2 + y_2 y_4 + 5y_4 + y_1^2 - y_1 y_3 + y_3^2 - u_1(t)y_1 - u_2(t)y_3,$$

где y_1, y_2 – обобщенные координаты; y_2, y_4 – обобщенные импульсы (рис. 5, 6).

На возмущающие силы системы $u_1(t), u_2(t)$ наложены ограничения

$$\{|u_1| \le 1, |u_2| \le 1\}.$$

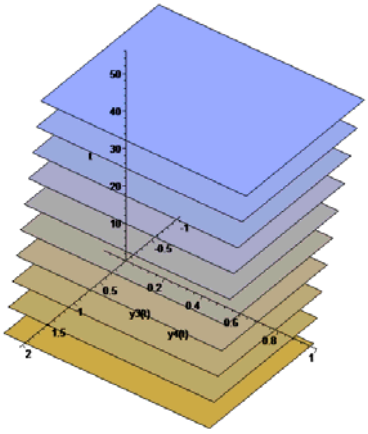


Рис. 4. Границы включения множеств достижимости в фазовой плоскости (относительно функции расстояния до преследуемого самолета и управляющего параметра) в трехмерной системе координат

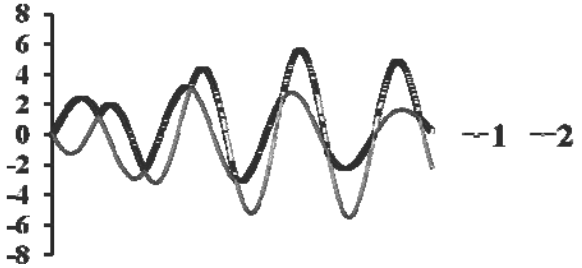


Рис. 5. Гарантированные границы множества достижимости задачи (8) – проекция на оси t–y_1: *1* – верхняя граница проекции множества достижимости; *2* – нижняя граница проекции множеств достижимости

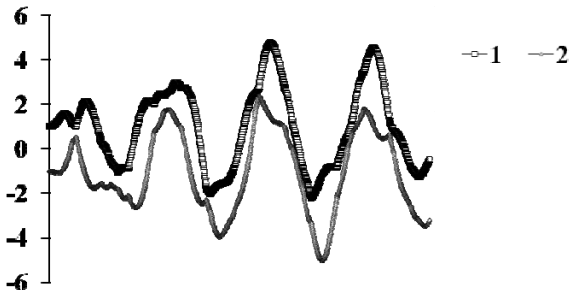


Рис. 6. Гарантированные границы множества достижимости задачи (8) – проекция на оси t–y_2: *1* – верхняя граница проекции множества достижимости; *2* – нижняя граница проекции множеств достижимости

Заключение. В статье описаны вопросы применения гарантированных методов оценки решений дифференциальных уравнений для вычисления включений предельных отклонений траекторий летательных аппаратов. Гарантированные методы, основанные на символьных формулах приближенных решений, были предложены в конце 1980-х и начале 1990-х годов, их описание можно найти также в [10–19]. В этих методах используются символьные формулы приближенных решений, что позволяет строить области множеств решений и находить оценки глобальных ошибок. Этот подход является новым, поскольку нахождение символьных формул приближенных решений требует специальной организации, преобразования, хранения больших наборов символьных данных. Гарантированные методы являются одним из эффективных инструментов для вычисления включений множеств достижимости и предельных отклонений летательных аппаратов.

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 // Изв. 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. Костоусова Е. К. Внешнее и внутреннее оценивание областей достижимости при помощи параллелотопов // Вычислительные технологии. 1998. Т. 3, № 2. С. 11–20.

7. Куржанский А. Б., Фурасов Б. Д. Задачи гарантированной идентификации билинейных систем с дискретным временем // Изв. Академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 4. С. 5–12.

8. Кинев А. Н., Рокитянский Д. У., Черноусько Ф. Л. Эллипсоидальные оценки фазового состояния линейных систем с параметрическими возмущениями и неопределенной матрицей наблюдений // Изв. Академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 1. С. 5–13.

9. Пацко Б. В., Пятко С. Г., Федотов А. А. Трехмерные множества достижимости нелинейных управляемых систем // Изв. Академии наук. Теория и системы управления. 2003. № 3. С. 8–16.

10. Кузьмин В. П., Ярошевский В. А. Оценка предельных отклонений фазовых координат динамической системы при случайных возмущениях. М. : Наука. ФизМатЛит, 1995. 298 с.

11. 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.

12. Рогалев А. Н. Использование границ глобальной ошибки в гарантированных оценках решений обыкновенных дифференциальных уравнений // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7, ч. 4. С. 88–95.

13. Рогалев А. Н. Гарантированные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе преобразования символьных формул // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8, № 5. С. 102–116.

14. Рогалев А. Н. Включение множеств решений дифференциальных уравнений и гарантированные оценки глобальной ошибки // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8, № 6. С. 80–94.

15. Рогалев А. Н. Границы множеств решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными начальными данными // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9, № 1. С. 86–93.

16. Рогалев А. Н. Символьные вычисления в гарантированных методах, выполненные на нескольких процессорах // Вестник НГУ. Сер. «Информационные технологии». 2006. Т. 4, вып. 1. С. 56–62.

17. Rogalyov A. N. Computation of reachable sets guaranteed bounds // Proceedings of the IASTED Intern. Conf. on Automation, Control, and Information Technology – Control, Diagnostics, and Automation (ACIT – CDA 2010). B6, Calgary, Canada : ACTA Press, 2010. P. 132–139.

18. Рогалев А. Н. Гарантированные оценки и построение множеств достижимости для нелинейных управляемых систем // Вестник СибГАУ. 2010. 5(31). С. 148–154.

19. Рогалев А. Н. Вычисление гарантированных границ множеств достижимости управляемых систем // Автометрия. 2011. Т. 47, № 3. С. 100–112.

20. 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.

21. 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.

22. Кобяков С. Я. Методы символического анализа динамических систем // Автоматика и телемеханика. 2004. № 4. С. 56–60.

23. Neumaier A. Taylor forms – Use and limits // Reliable computing. 2003. Vol. 9, № 1. P. 43–79.

24. Eaves R. C., Saigal R. Homotopies for computation of fixed points on unbounded regions // Mathematical Programming. 1972. Vol. 3, № 2. P. 225–237.

25. Тятюшкин А. И., Федунов Б. Е. Возможности защиты от атакующей ракеты задней полусферы самолета вертикальным маневром // Изв. Академии наук. Теория и системы управления. 2006. № 1. С. 125–132.

References

1. Kurzhanskiy A. B. *Upravlenie i nablyudenie v usloviyakh neopredelennosti.* [Control and Observation under Uncertainty]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 390 p.

2. Chernousko F. L. *Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem* [Estimation of Phase State of Dynamic Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 320 p.

3. Chernousko F. L. State Estimation for Dynamic Systems. Boca Raton: CRC Press, 1994. 304 p.

4. Ovseevich A. I, Shmatko A. M. [Concerning the comparison of probabilitic and guaranteed approaches to the prediction of the phase state of dynamical systems]. *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya.* 2007, no. 4, p. 11–16 (In Russ.).

5. Chernousko F. L. [Ellipsoidal approximation of reachable sets of controlled linear systems with uncertain matrix]. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika.* 1996, vol. 60, no. 6, p. 940–950 (In Russ.).

6. Kostousova E. K. [External and Internal Estimation of Reachable Sets Using Parallelotopes]. *Vychislitel'nye Tekhnologii.* 1998, vol. 3, no. 2, p. 11–20 (in Russ.).

7. Kurzhanskii A. B., Furasov B. D. [Problems of Guaranteed Identification of Bilinear Systems with Discrete Time]. *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya.* 2000, no. 4, p. 5–12 (in Russ.).

8. Kinev A. N., Rokityanskiy D. U., Chernous'ko F. L. [Ellipsoidal Estimations of Phase State of Linear Systems with Parametrical Perturbations and with Undefined Observations Matrix]. *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya.* 2002, no. 1, p. 5–13 (in Russ.).

9. Patsko B. V., Pyatko S. G., Fedotov A. A. [Three-dimension Reachable Sets of Nonlinear Controlled Systems]. *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya.* 2003, no. 3, p. 8–16 (in Russ.).

10. Kuz'min V. P., Yaroshevskiy V. A. *Otsenka predel'nykh otkloneniy fazovykh koordinat dinamicheskoy sistemy pri sluchaynykh vozmushcheniyakh.* [Estimation of Maximum Deviations of Dynamical System Phase Coordinates Subjected to Stochastic Perturbations]. Moscow, Nauka Publ., 1995, 298 p. (In Russ.).

11. Novikov V. A., Rogalyov A. N. [Construction of convergent upper and lower estimations of Solutions of Ordinary Differential Equations Systems]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki.* 1993, vol. 33, no. 2, p. 219–231 (in Russ.).

12. Rogalyov A. N. [Using Boundaries of Global Error for Guaranteed Estimates of Ordinary Differential Equations Solutions]. *Vychislitel'nye tekhnologii.* 2002, vol. 7, no. 4, p. 88–95 (in Russ.).

13. Rogalyov A. N. [Guaranteed Methods for Ordinary Differential Equations Solving Based on Symbolic Formulae Development]. *Vychislitel'nye tekhnologii.* 2003, vol. 8, no. 5, p. 102–116 (in Russ.).

14. Rogalyov A. N. [Inclusion of Sets of Differential Equations Solutions and Guaranteed Bbounds of Global Error]. *Vychislitel'nye tekhnologii.* 2003, vol. 8, no. 6, p. 80–94 (in Russ.).

15. Rogalyov A. N. [Boundaries of Solutions Sets of Systems of Ordinary Differential Equations with Interval Initial Data]. *Vychislitel'nye tekhnologii.* 2004, vol. 9, no. 1, p. 86–93 (in Russ.).

16. Rogalyov A. N. [Symbolic computations in guaranteed methods, executed on multiple processors]. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii.* 2006, vol. 4, no. 1, p. 56–62 (in Russ.).

17. 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).* ACTA Press, B6, Calgary, Canada. 2010, p. 132–139.

18. Rogalyov A. N. [Guaranteed Bounds and Reachable Sets Constructing for Nonlinear Controlled Systems]. *Vestnik SibGAU.* 2010, no. 5(31), p. 148–154 (in Russ.).

19. Rogalyov A. N. [Computing of Guaranteed Bounds of Controlled Systems Reachable Sets]. *Avtometriya.* 2011, vol. 47, no. 3, p. 100–112 (in Russ.).

20. Rogalyov 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.

21. Rogalyov A. N., Rogalyov 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.).

22. Kobjakov S. Ja. [Methods of Symbolic Analysis of Dynamical Sytems]. *Avtomatika i telemekhanika.* 2004, no. 4, p. 56–60 (in Russ.).

23. Neumaier A. Taylor forms – Use and limits. *Reliable computing.* 2003, vol. 9, no. 1, p. 43–79.

24. Eaves R. C., Saigal R. [Homotopies for computation of fixed points on unbounded regions]. *Mathematical Programming.* 1972, vol. 3, no. 2, p. 225–237.

25. Tyatyushkin A. I, Fedunov B. E. [Possible protection against attacking missiles rear hemisphere of the aircraft vertical maneuver]. *Izvestija Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*. 2006, no. 1, p. 125–132 (in Russ.).

© Рогалев А. Н., Рогалев А. А., 2015

UDC 519.6

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 113–118

HYBRIDIZATION OF LOCAL SEARCH WITH SELF-CONFIGURING GENETIC PROGRAMMING ALGORITHM FOR AUTOMATED FUZZY CLASSIFIER DESIGN

M. E. Semenkina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: semenkina88@mail.ru

A fuzzy classifier is one of the intelligent information technologies allowing the generation of a fuzzy rule base suitable for interpretation by human experts. For a fuzzy classifier automated design the hybrid self-configuring evolutionary algorithm is proposed. The self-configuring genetic programming algorithm is suggested for the choice of effective fuzzy rule bases. For the tuning of linguistic variables the self-configuring genetic algorithm is used. A hybridization of self-configuring genetic programming algorithms (SelfCGPs) with a local search in the space of trees is fulfilled to improve their performance for fuzzy rule bases automated design. The local search is implemented with two neighborhood systems (1-level and 2-level neighborhoods), three strategies of a tree scanning ("full", "incomplete" and "truncated") and two ways of a movement between adjacent trees (transition by the first improvement and the steepest descent). The Lamarckian local search is applied on each generation to ten percent of best individuals. The performance of all developed memetic algorithms is estimated on a representative set of test problems of the functions approximation as well as on real-world classification problems. It is shown that developed memetic algorithm requires comparable amount of computational efforts but outperforms the original SelfCGP for the fuzzy rule bases automated design. The best variant of the local search always uses the steepest descent and full scanning for fuzzy classifier design. Additional advantage of the approach proposed is a possibility of the automated features selection. The numerical experiment results show the competitiveness of the approach proposed.

Keywords: genetic programming algorithm, self-configuration, fuzzy classifier, local search on discrete structures.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 113–118

ГИБРИДИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОГО СПУСКА С САМОКОНФИГУРИРУЕМЫМ АЛГОРИТМОМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРИРОВАНИЯ НЕЧЕТКИХ КЛАССИФИКАТОРОВ

М. Е. Семенкина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: semenkina88@mail.ru

Нечеткие классификаторы являются одним из видов интеллектуальных информационных технологий, использующих базы нечетких правил, которые могут быть легко интерпретированы человеком-экспертом. При автоматическом создании нечетких классификаторов в данной работе используются самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для генерирования баз правил и самоконфигурируемый генетический алгоритм для настройки лингвистических переменных. Рассматриваются самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования баз правил для нечетких классификаторов и локальный спуск по деревьям, представляющим собой базы правил. Для локального спуска по дереву представлено два способа перехода между деревьями (переход по первому улучшению и наискорейший спуск), две системы окрестностей (1-соседняя и 2-соседняя окрестности) и три стратегии просмотра этих систем окрестностей («полный», «неполный» и «усеченный» просмотры). В ходе работы было выполнено сравнение эффективности всех вариантов выполнения локального спуска по дереву. Эффективность всех предложенных алгоритмов оценивалась на репрезентативном множестве тестовых задач и на двух реальных практических задачах классификации. По результатам тестирования можно сделать вывод, что локальный спуск, производящий полной просмотр 2-сосденей системы окрестностей, продемонстрировал лучшую эффективность и существенно повысил эффективность самоконфигурируемого алгоритма генетического программирования для автоматического генерирования нечетких классификаторов. Данный гибридный алгоритм почти всегда превосходит лучший для конкретной задачи вариант алгоритма генетического программирования, что позволяет полностью отказаться от выбора его наиболее эффективного варианта настроек. При

решении реальных задач анализа данных гибридный алгоритм продемонстрировал лучший результат среди всех рассмотренных альтернатив.

Ключевые слова: алгоритм генетического программирования, самоконфигурация, нечеткий классификатор, локальный поиск на дискретных структурах.

Introduction. A fuzzy classifier [1] is one of the intelligent information technologies allowing the generation of a fuzzy rule base suitable for interpretation by human experts. It is an appropriate method for solving classification problems, which are a well-known application of natural computing algorithms.

However, the process of fuzzy classifier design and adjustment is rather complex even for experts in fuzzy systems. For automated implementation of the fuzzy classifier it is necessary to consider its design as an optimization problem. This problem is very complicated for standard optimization tools, which makes evolutionary algorithms rather popular in this field [2; 3]. A genetic programming algorithm (GP) can be used for the automated design of the fuzzy classifier rule base because of the ability of the GP to work with variable length chromosomes. The use of a GP can simplify the implementation of the Pittsburg [3] method and, in this case, there is no necessity to implement the Michigan [2] method for reducing the dimension of the search space.

It is well known that a GP requires a lot of effort in its adoption for any problem in hand. That is why before suggesting GP usage to end users, e. g., medicine or finance specialists for application in the development of classification tools, we must take care to avoid those main issues which are problems even for evolutionary computation experts. We have to suggest a way to avoid issues in the adjustment of the algorithm and the self-configuration for GP (Self-CGP) [4] could be a solution here.

It would be a good idea to use a local search for trees representing a fussy classifier rule base to improve the Self-CGP effectiveness. However, although the local search is often used for real valued and discrete optimization problems nevertheless it is not commonplace to use it for such a data structure as a tree. In this paper, we consider a new way for the local search on trees representing fuzzy rule bases.

Having conducted numerical experiments, we have found that the proposed approach positively impacts on the performance of the algorithm and deserves special attention and further investigation.

The rest of the paper is organized as follows. Section 1 explains the idea of self-configuring evolutionary algorithms. Section 2 describes the proposed method of fuzzy classifier automated design. Section 3 describes the idea of a local search for trees. Section 4 shows test results for the method proposed. Section 5 presents the results of the numerical experiments comparing the performance of the proposed approach and alternatives in solving real-world problems. In the Conclusion we discuss the results.

Self-configuring evolutionary algorithm. The self-configuring evolutionary algorithms (SelfCEA), which do not require for their adjustment any efforts of the end user as the method is adjusted automatically, use a dynamic adaptation on the population level [5] and centralized control techniques [6] for parameter settings with some differences from the usual approaches. Instead of tuning real parameters, variants of settings are used, namely types of selection (fitness proportional, rank-based, and tournament-based with three tournament sizes), crossover (one-point, two-point, as well as equiprobable, fitness proportional, rank-based, and tournament-based uniform crossovers [7]), population control and level of mutation (medium, low, high for all mutation types). Each of these has its own initial probability distribution, which is changed as the algorithm is executed [4].

This self-configuring technique can be used both for genetic algorithms (SelfCGA) and genetic programming (SelfCGP). In [8] the SelfCGA the performance was estimated on 14 test problems from [9]. As a commonly accepted benchmark for GP algorithms is still an “open issue” [10], the symbolic regression problem with 17 test functions borrowed from [9] was used in [7] for testing the self-configuring genetic programming algorithm. The statistical significance was estimated with ANOVA.

Analysing the results of SelfCGA [8] and SelfCGP [7] performance evaluation, we observed that the self-configuring evolutionary algorithms demonstrate better reliability than the average reliability of the corresponding single best algorithm. They can be used instead of conventional EA in complex problem solving.

Self-Configuring Evolutionary Algorithm for Automated Fuzzy Classifier Design. We have to describe our method of modelling and optimizing a rule base for a fuzzy logic system with GP and linguistic variables adjusted with a GA.

Usually, a GP algorithm works with a tree representation of solutions, defined by functional and terminal sets, and exploits specific solution transformation operators (such as selection, crossover, or mutation) until the termination condition is met [11]. The terminal set of our GP includes the terms of the output variable, i. e. class markers. The functional set includes a specific operation for dividing an input variables vector into sub-vectors or, in other words, for the separation of the examples set into parts according to input variable values. It might be that our GP algorithm will ignore some input variables and will not include them in the resulting tree, i. e., a high performance rules base that does not use all problem inputs can be designed. This feature of our approach allows the use of our GP for the selection of the most informative combination of problem inputs.

The tuning of linguistic variables is executed to evaluate the fuzzy system fitness that depends on its performance when solving the problem in hand, e. g., the number of misclassified instances. A linguistic variable consists of a set of terms or linguistic variable values representing some fuzzy concepts. Each of the terms is defined by a membership function. The tuning of linguistic variables consists in the optimization of membership function parameters simultaneously for all the terms of linguistic

variables involved in problem solving. In this paper, we propose adjusting linguistic variables with the self-configuring genetic algorithm (SelfCGA) combined with the conjugate gradient method. We use here membership functions with a Gaussian shape. For the coding of membership function parameters, the mean value of the Gaussian function and its standard deviation are written consecutively for each term in the chromosome. For automatic control of the number of terms the possibility of ignoring a term is provided: all bits of the ignored term are set as 0 with the probability equal to 1/3.

The efficiency of the proposed approach has been tested on a representative set of known problems. The test results showed that the fuzzy classifiers designed with the suggested approach (SelfCGP-FL) [12] have a small number of rules in comparison with the full rule base. These fuzzy systems usually have a small enough classification error. This is why we can recommend the developed approach for solving real world problems.

Local search for discrete structures. We can formulate some general rules of neighbourhood system construction for trees that can be symbolic expressions, neural network models or fuzzy logic:

1. The tree is neighbouring to the original one if one element of the terminal set was replaced with another element.
2. The tree is neighbouring to the original one if one binary function from the functional set was replaced with another binary function.
3. The tree is neighbouring to the original one if one unary function from the functional set was replaced with another unary function.
4. Changes in the tree associated with functional elements generate larger changes in the phenotype than changes in the elements of the terminal set.

Trees with modified leaves (terminal set elements) will be called 1-level neighbours and trees with a modified functional element will be called 2-level neighbours. In our hybridization of the local search with self-configuring genetic programming for fuzzy logic classifier design, trees with a randomly replaced class type will belong to the 1-level neighbourhood and trees with a randomly replaced feature for vector dividing on sub-vectors will belong to the 2-level neighbourhood.

The search in such neighbourhoods for the locally best-found solution should improve the efficiency of the problem solving without a significant increase in computational efforts. However, the effectiveness of the local search depends not only on the choice of neighbourhood but also on the method of search.

There are several ways of movement between adjacent trees: transition by the first improvement and steepest descent that mean an exhaustive search of neighbouring trees. In this paper, we will use both ways of movement and both systems of neighbourhood. In the first case, the 2-level neighbourhood will be used at the beginning of the algorithm execution and the 1-level neighbourhood will be used on the later stages. We call this method of search a “full” local search. In the second case, only the 1-level neighbourhood will be used, this variant is named an “incomplete” local search. Changes in tree nodes that are closer to the top of the tree have a more significant impact on the result obtained. Therefore, when we use the 2-level neighbourhood, nodes which are closer to the top will be changed before others. This means that the tree will be considered from in the top-down way. Furthermore a “truncated” local search will be considered that means viewing only n randomly chosen nodes in the tree.

The local search procedure on the tree structure can be described as follow:

1. All tree nodes receive their numbers and order in which they will be considered: k_1, k_2, ..., k_n, where n is equal to the number of nodes which must be considered, k_i is the number of the i-th node. The order of considered nodes depends on the chosen strategy of neighbourhood searching (“full”, “incomplete” or “truncated” local searches). Set i to be equal to 1.
2. The new value for the k_i-th node will be randomly chosen, which has to belong to the corresponding neighbourhood (the 1-level neighbourhood for leaves and the 2-level neighbourhood in other cases).
3. If i is not equal to n then go to the step 3.1, otherwise go to step 3.2.

3.1. If the fitness value for the modified tree is better than for the original tree then, in the case of transition by the first improvement, we save the modified tree, set up $i = i + 1$ and go to step 2, and, in the case of steepest descent, we save the fitness value and the modified tree and continue searching the original tree with $i = i + 1$ (go to step 2). Otherwise, if there is no fitness improvement, we continue searching the original tree with $i = i + 1$ (go to step 2).

3.2. In the case of transition by the first improvement, the local search procedure is finished. In the case of steepest descent, we substitute the original tree by the best one found and with this new tree go to step 1. If the new tree is equal to the original one than the local search procedure is finished.

During implementation and testing of the considered local search procedures the number of additional fitness function estimations must be taken into account. This number significantly depends on the way of the movement and the strategy for searching the neighbourhood. In addition, the speed of the hybrid algorithm depends on the selection of individuals to be improved by the local search (only the best individual or p % best in each generation, or once every t generations).

Experiment results for hybridization of local search with self-configuring genetic programming algorithm for automated fuzzy classifier design. For the test of the proposed hybrid algorithm, the same test function set was used as for the self-configuring genetic programming algorithm for automated fuzzy classifier generation. Since local search algorithms precisely identify the optimum position, the comparison of efficiency should be done with the criterion of reliability. The reliability of the algorithm is the ratio of the number of successful algorithm runs to the total number of algorithm runs. The algorithm run is considered as successful if the desired accuracy is achieved. Each algorithm received the same computing resources to find a solution and was launched 100 times for each test problem. The statistical significance was estimated with ANOVA. During testing

the performance evaluation was performed for the self-configuring genetic programming algorithm hybridized with three types of local search ("full", "incomplete" and "truncated") and two strategies for movement ("first improvement" and "steepest descent") that can be designated as "LS-1imp.+SelfCGP-FL-f", "LS-1imp.+SelfCGP-FL-inc", "LS-1imp.+SelfCGP-FL-t", "LS-SD+SelfCGP-FL-f", "LS-SD+SelfCGP-FL-inc" and "LS-SD+SelfCGP-FL-t" respectively.

The results obtained are presented in tab. 1.

Table 1

Algorithm reliability on test problems

Algorithm	Reliability	Average number of fitness function evaluation
SelfCGP+FL	0.64 [0.33, 0.96]	[4600, 21100]
LS-1imp+SelfCGP-FL-f	0.68 [0.37, 0.97]	[4340, 20500]
LS-1imp+SelfCGP-FL-inc	0.64 [0.34, 0.96]	[4150, 19800]
LS-1imp+SelfCGP-FL-t	0.65 [0.35, 0.97]	[4210, 20050]
LS-SD+SelfCGP-FL-f	0.72 [0.43, 0.99]	[4540, 21000]
LS-SD+SelfCGP-FL-inc	0.66 [0.38, 0.96]	[4380, 20650]
LS-SD+SelfCGP-FL-t	0.68 [0.39, 0.96]	[4500, 20800]

The follow criteria for evaluating the algorithms were selected:

1. Reliabilities that were averaged over all test problems and the spread of their values in brackets ("Reliability").
2. Information on the number of resources required to find the first suitable solutions in terms of accuracy that were averaged over all tasks and in brackets the spread on all tasks ("Average number of fitness function evaluation").

It is easy to see that the local search variant with a greater neighbourhood size and more detailed search though it has better reliability and a worse number of fitness function evaluations. The proposed local search algorithms increased the efficiency of the previously considered self-configuring genetic programming algorithms. With the joint application of self-configuring genetic programming and local search algorithms the performance is more often greater than of the best setting variant of genetic programming algorithms.

Numerical Experiments with Real World Problems. The developed approach was applied to two credit scoring problems from the UCI repository [13] often used to compare the accuracy with various classification models:

Credit (Australia-1) (14 attributes, 2 classes, 307 examples of creditworthy customers and 383 examples of non-creditworthy customers);

Credit (Germany) (20 attributes, 2 classes, 700 records of creditworthy customers and 300 records of non-creditworthy customers).

Both classification problems were solved with fuzzy classifiers designed by hybrid SelfCGP (SelfCGP-FL) hybridized with a different variant of the local search (LS). This technique was trained on 70 % of the instances from the data base and validated on the remaining 30 % of examples. The results of the validations (the portion of correctly classified instances from the test set) averaged for 40 independent runs are given in tab. 2 below. The statistical significance of all our experiments was estimated with ANOVA.

We first compared the fuzzy classifier performance with ANN-based [14; 15] and symbolic regression based [7] classifiers automatically designed by SelfCGP (SelfCGP+ANN and SelfCGP+SRF). As we have observed, the algorithm proposed in this paper demonstrates high performance on both classification tasks.

We then conducted the comparison of the proposed algorithms with alternative classification techniques. The results for the alternative approaches have been taken from scientific literature. In [16] the performance evaluation results for these two data sets are given for the authors' two-stage genetic programming algorithm (2SGP) specially designed for bank scoring as well as for the following approaches taken from other papers: conventional genetic programming (GP), multilayered perceptron (MLP), classification and regression tree (CART), C4.5 decision trees, *k* nearest neighbors (*k*-NN), and linear regression (LR). We have taken additional material for comparison from [17] which includes evaluation data for the authors' automatically designed fuzzy rule based classifier as well as for other approaches found in the literature: the Bayesian approach, boosting, bagging, the random subspace method (RSM), and cooperative coevolution ensemble learning (CCEL). The results obtained are given in tab. 2. As can be seen from tab. 2, the proposed algorithm demonstrates the best performance for both problems.

It is necessary to stress that fuzzy classifiers designed by SelfCGP hybridized with local search give additionally human interpreted linguistic rules which is not the case for the majority of other algorithms in tab. 2. Designed rule bases usually contain 10–15 rules which do not include all given inputs, i. e. are much easier to be interpreted by humans.

Table 2

The comparison of classification algorithms

Classifier	Australian credit	German credit
LS+SelfCGP-FL	0.9041	0.8021
2SGP	0.9027	0.8015
SelfCGP-FL	0.9022	0.7974
SelfCGP+ANN	0.9022	0.7954
SelfCGP+SRF	0.9022	0.7950
Fuzzy	0.8910	0.7940
C4.5	0.8986	0.7773
CART	0.8986	0.7618
k-NN	0.8744	0.7565
LR	0.8696	0.7837
RSM	0.8660	0.7460
Bagging	0.8470	0.6840
Bayesian	0.8470	0.6790
Boosting	0.7600	0.7000
CCEL	0.7150	0.7151

Analysis of the data sets shows that input variables can be divided into some groups so that the inputs of one group are highly correlated to each other but the correlation between inputs of different groups is weak. There are also inputs weakly correlated with the output. A fuzzy classifier designed with the suggested hybrid SelfCGP doesn't usually include inputs of the last kind. Moreover, it usually includes members of every group of inputs but only one input from each, i. e. it does not include highly correlated inputs in the rule base. This allows the algorithm to create relatively small rule bases with rather simple rules.

Conclusion. The self-configuring genetic programming algorithm and the local search were hybridized to design fuzzy classifiers with high efficiency. A special way of representing the solution provides the opportunity to create relatively small rule bases with rather simple rules. The quality of classification is high as well, which was demonstrated through the solving of two real world classification problems from the area of bank scoring.

The results obtained allow us to conclude that the developed approach is workable and useful and should be further investigated and expanded.

Acknowledgements. This research is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the State assignment № 2.1889.2014/K. The author expresses his gratitude to Mr. Ashley Whitfield for his efforts to improve the text of this article.

Благодарности. Исследования поддерживаются Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках государственного проектного задания № 2.1889.2014/К. Автор выражает признательность Эшли Уитфильду за помощь в совершенствовании текста статьи.

References

1. Ishibuchi H., Nakashima T., Murata T. Performance Evaluation of Fuzzy Classifier Systems for Multidimensional Pattern Classification Problems. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics,* 1999, vol. 29, p. 601–618.

2. Cordón O., Herrera F., Hoffmann F. and Magdalena L. Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases. *Singapore: World Scientific.* 2001.

3. Herrera F. Genetic Fuzzy Systems: Taxonomy, Current Research Trends and Prospects. *Evol. Intel.* 2008, vol. 1, no. 1, p. 27–46.

4. Semenkina M. E. [Effectiveness investigation of self-adaptive evolutionary algorithms for data mining information technology design]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy.* 2013, no. 1, p. 13–23 (In Russ.).

5. Meyer-Nieberg S., Beyer H.-G. Self-Adaptation in Evolutionary Algorithms. Lobo F. G., Lima C. F., Michalewicz Z. (eds.) *Parameter Setting in Evolutionary Algorithm,* 2007, vol. 54, p. 47–75.

6. Gomez J. Self Adaptation of Operator Rates in Evolutionary Algorithms. *Deb, K. et al. (eds.) GECCO 2004. LNCS,* 2004, vol. 3102, p. 1162–1173.

7. Semenkin E., Semenkina M. Self-Configuring Genetic Programming Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE CEC),* 2012, p. 1918–1923.

8. Semenkin E. S., Semenkina M. E. Self-Configuring Genetic Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator. *Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science,* vol. 7331. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, p. 414–421.

9. Finck S. et al. Real-Parameter Black-Box Optimization Benchmarking. *Presentation of the noiseless functions. Technical Report Researh Center PPE.* 2009.

10. O'Neill M., Vanneschi L., Gustafson S., Banzhaf W. Open Issues in Genetic Programming. *Genetic Programming and Evolvable Machines 11,* 2010, p. 339–363.

11. Poli R., Langdon W.B., McPhee N.F. A Field Guide to Genetic Programming. *Published via http://lulu.com.* 2008. Available at: http://www.gp-field-guide.org.uk.

12. Semenkina M., Semenkin E. Hybrid Self-configuring Evolutionary Algorithm for Automated Design of Fuzzy Classifier. *Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Berlin, Hedelberg, 2014, vol. 8791, part 1, p. 310–317.

13. 13. Frank A., Asuncion A. UCI Machine Learning Repository (2010) *Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science.* Available at: http://archive.ics.uci.edu/ml.

14. Semenkin E., Semenkina M. Artificial Neural Networks Design with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm. Filipic B., Silc J. (Eds.) *Bio-inspired Optimization Methods and their Applications: Proceedings of the Fifth International conference BIOMA 2012,* 2012, p. 291–300.

15. Semenkin E. S., Semenkina M. E., Panfilov I. A. Neural Network Ensembles Design with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm for Solving Computer Security Problems. *Computational Intelligence in Security for Information Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, vol. 189, p. 25–32.

16. Huang J.-J., Tzeng G.-H., Ong Ch.-Sh. Two-Stage Genetic Programming (2SGP) for the Credit Scoring Model. *Applied Mathematics and Computation,* 2006, vol. 174, p. 1039–1053.

17. Sergienko R., Semenkin E., Bukhtoyarov V. Michigan and Pittsburgh Methods Combining for Fuzzy Classifier Generating with Coevolutionary Algorithm for Strategy Adaptation. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, IEEE Press, New Orleans, LA, 2011.

Библиографические ссылки

1. Ishibuchi H., Nakashima T., Murata T. Performance Evaluation of Fuzzy Classifier Systems for Multidimensional Pattern Classification Problems // Proc. of IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1999. T. 29. P. 601–618.

2. Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases / O. Cordón [et al.]. Singapore : World Scientific. 2001.

3. Herrera F. Genetic Fuzzy Systems: Taxonomy, Current Research Trends and Prospects // Evol. Intel. 2008. Vol. 1, no. 1. P. 27–46.

4. Семенкина М. Е. Самоадаптивные эволюционные алгоритмы проектирования информационных технологий интеллектуального анализа данных // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 1. С. 13–23.

5. Meyer-Nieberg S., Beyer H.-G. Self-Adaptation in Evolutionary Algorithms // Parameter Setting in Evolutionary Algorithm / F. G. Lobo, C. F. Lima, Z. Michalewicz (eds.). 2007. Vol. 54. Pp. 47–75.

6. Gomez J. Self Adaptation of Operator Rates in Evolutionary Algorithms // Proc. of GECCO 2004. LNCS. 2004. Vol. 3102. Pp. 1162–1173.

7. Semenkin E., Semenkina M. Self-Configuring Genetic Programming Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator // Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE CEC). 2012. Pp. 1918–1923.

8. Semenkin E. S., Semenkina M. E. Self-Configuring Genetic Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator // Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science 7331. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. Pp. 414–421.

9. Real-Parameter Black-Box Optimization Benchmarking 2009. Presentation of the noiseless functions / S. Finck [et al.] // Technical Report Researh Center PPE. 2009.

10. Open Issues in Genetic Programming / M. O'Neill [et al.] // Genetic Programming and Evolvable Machines. 2010. № 11. Pp. 339–363.

11. Poli R., Langdon W. B., McPhee N. F. A Field Guide to Genetic Programming [Электронный ресурс] // Published via http://lulu.com. 2008. (With contributions by J. R. Koza). URL: http://www.gp-field-guide.org.uk.

12. Semenkina M., Semenkin E. Hybrid Self-configuring Evolutionary Algorithm for Automated Design of Fuzzy Classifier // Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. 2014. Vol. 8791, Part 1. Pp. 310–317.

13. Frank A., Asuncion A. UCI Machine Learning Repository [Электронный ресурс]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science, 2010. URL: http://archive.ics.uci.edu/ml.

14. Semenkin E., Semenkina M. Artificial Neural Networks Design with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm // Bio-inspired Optimization Methods and their Applications : Proceedings of the Fifth Intern. Conf. BIOMA 2012 / B. Filipic, J. Silc (Eds.). 2012. Pp. 291–300.

15. Semenkin E. S., Semenkina M. E., Panfilov I. A. Neural Network Ensembles Design with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm for Solving Computer Security Problems // Computational Intelligence in Security for Information Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing 189. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. Pp. 25–32.

16. Huang J.-J., Tzeng G.-H., Ong Ch.-Sh. Two-Stage Genetic Programming (2SGP) for the Credit Scoring Model // Applied Mathematics and Computation. 2006. № 174. Pp. 1039–1053.

17. Sergienko R., Semenkin E., Bukhtoyarov V. Michigan and Pittsburgh Methods Combining for Fuzzy Classifier Generating with Coevolutionary Algorithm for Strategy Adaptation // Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation. New Orleans, LA : IEEE Press, 2011.

© Semenkina M. E., 2015

UDC 004.93

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 119–123

FEATURES SELECTION FOR TEXT CLASSIFICATION BASED ON CONSTRAINTS FOR TERM WEIGHTS

R. B. Sergienko*, M. Shan Ur Rehman, A. E. Khan, T. O. Gasanova, W. Minker

Ulm University
43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany
*E-mail: roman.sergienko@uni-ulm.de

Text classification is an important data analysis problem which can be applied in different domains including air-space industry. In this paper different text classification problems such as opinion mining and topic categorization are considered. Different text preprocessing techniques (TF-IDF, ConfWeight, and the Novel TW) and machine learning algorithms for classification (Bayes classifier, k-NN, SVM, and artificial neural network) are applied. The main goal of the presented investigations is to decrease text classification problem dimensionality by using features selection based on constraints for term weights. Such features selection provides significant reduction of dimensionality and less computational time for calculations. Besides, the use of constraints for term weights could increase classification effectiveness. We have observed such increase for three out of five problems. In the remaining two problems, no significant change and a decrease of classification effectiveness was observed.

Keywords: topic categorization, text classification, opinion mining, features selection, term weighting, constraint.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 119–123

ОТБОР ПРИЗНАКОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ НА ОСНОВЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ ВЕСОВ ТЕРМОВ

Р. Б. Сергиенко*, М. Шан Ур Реман, А. Э. Хан, Т. О. Гасанова, В. Минкер

Ульмский университет
Германия, 89081, г. Ульм, Аллея Альберта Эйнштейна, 43
*E-mail: roman.sergienko@uni-ulm.de

Классификация текста – актуальная задача анализа данных, которая может найти применение в различных областях, включая аэрокосмическую индустрию. Рассматриваются различные задачи классификации текста, такие как извлечение мнения и категоризация темы. Применяются различные походы предобработки текстовой информации (TF-IDF, ConfWeight, Novel TW) и различные алгоритмы машинного обучения для классификации (классифкатор Байеса, метод ближайших соседей, метод опорных векторов, искусственные нейронные сети). Главная задача представленных в статье исследований – уменьшение размерности задачи классификации текста за счёт отбора признаков на основе ограничений для весов термов. Такое снижение размерности обеспечивает значимое снижение размерности и сокращает время для вычислений. Кроме того, использование ограничений на веса термов может повысить точность классификации на некоторых задачах. Такое увеличение наблюдалось на трёх задачах из пяти, на одной задаче не наблюдалось значимых изменений и ещё на одной зафиксировано незначительное снижение точности классификации.

Ключевые слова: категоризация темы, классификация текста, извлечение мнения, отбор признаков, взвешивание термов, ограничение.

1. Introduction

Nowadays, Internet and social media generate a huge amount of textual information. It is increasingly important to develop methods of text processing such as text classification. Text classification is very important for such problems as automatic opinion mining (sentiment analysis) and topic categorization of different articles from newspapers and Internet.

Text classification can be considered to be a part of natural language understanding, where there is a set of predefined categories and the task is to automatically assign new documents to one of these categories. The method of text preprocessing and text representation influences the results that are obtained even with the same classification algorithms.

The most popular model for text classification is vector space model. In this case text categorization may be considered as a machine learning problem. Complexity of text categorization with vector space model is compounded by the need to extract the numerical data from text information before applying machine learning methods. Therefore text categorization consists of two parts: text

preprocessing and classification using obtained numerical data.

All text preprocessing methods are based on the idea that the category of the document depends on the words or phrases from this document. The simplest approach is to take each word of the document as a binary coordinate and the dimension of the feature space will be the number of words in our dictionary ("bag of the words" method [1]).

There exist more advanced approaches for text preprocessing to overcome this problem such as TF-IDF [2] and Confident Weights (ConfWeight) methods [3]. The task of these text preprocessing methods is to assign weight to each word in a document ranging between [0, 1] which shows the importance of contribution of a word in a document. A novel term weighting method [4] is also considered, which has some similarities with the ConfWeight method, but has improved computational efficiency. In [4] the novel term weighting method was applied for natural language call routing and in [5] it was applied for opinion mining and topic categorization problems.

For large databases it is important to reduce dimensionality of the problem for effective application of machine learning algorithms. The main purpose of dimensionality reduction is to decrease the processing time for a particular machine learning algorithm while still producing the same or acceptable classification results. There are two different ways to reduce dimensionality: features extraction and features selection. In the first approach a small number new features is generated from previous ones. In the second approach useless and non-informative features are removed. In [6] the novel features extraction method for classification was proposed. The method uses terms clustering and optimization of cluster weights with cooperative coevolutionary algorithm [7]. In this paper we propose dimensionality reduction method for text classification based on features selection.

Term weighting techniques provide a natural method for features selection based on constraints for term weights. In text preprocessing, it can be noted that some words in documents are actually meaningless and they do not effectively contribute to the end result. In principle these words are not useful for text classification, moreover due to these words we end up with a bigger feature space. Therefore, the main goal of the investigations presented in the paper is to decrease text classification problem dimensionality with features selection based on constraints for term weights. Also a comparison between classification effectiveness without constraints and with difference values of the constraints for different text classification problems is presented.

In this paper we have used *k*-nearest neighbors algorithm, Bayes Classifier, support vector machine (SVM), and Neural Network as classification methods. *RapidMiner* has been used as implementation software [8].

For the application of algorithms and comparison of the results we have used the DEFT ("Défi Fouille de Texte") Evaluation Package 2008 [9] which has been provided by ELRA and publically available corpora from DEFT'07 [10]. Some results of text classification on the databases are available in the papers [11–14].

This paper is organized as follows: Section 2 describes the corpora. Section 3 explains different term weighting methods. In Section 4 we discuss our experimental results. Finally, we draw some conclusions in Section 5.

2. Corpora Description

The focus of DEFT 2007 campaign is the sentiment analysis, also called opinion mining. We have used 3 publically available corpora: reviews on books and movies (*Books*), reviews on video games (*Games*) and political debates about energy project (*Debates*). The topic of DEFT 2008 edition is related to the text classification by categories and genres. The data consists of two corpora (T1 and T2) containing articles of two genres: articles extracted from French daily newspaper Le Monde and encyclopedic articles from Wikipedia in French language. This paper reports on the results obtained using both tasks of the campaign and focuses on detecting the category.

All databases are divided into a training (60 % of the whole number of articles) and a test set (40 %). To apply our algorithms we extracted all words which appear in the training set regardless of the letter case and we also excluded dots, commas and other punctual signs. We have not used any additional filtering as excluding the stop or ignore words.

Table 1

Corpora description (DEFT'07)

Corpus	Size	Classes
Books	Train size = 2074 Test size = 1386 Vocabulary = 52507	0: negative, 1: neutral, 2: positive
Games	Train size = 2537 Test size = 1694 Vocabulary = 63144	0: negative, 1: neutral, 2: positive
Debates	Train size = 17299 Test size = 11533 Vocabulary = 59615	0: against, 1: for

Table 2

Corpora description (DEFT'08)

Corpus	Size	Classes
T1	Train size = 15223 Test size = 10596 Vocabulary = 202979	0: Sport, 1: Economy, 2: Art, 3: Television
T2	Train size = 23550 Test size = 15693 Vocabulary = 262400	0: France, 1: International, 2: Literature, 3: Science, 4: Society

3. Text Preprocessing Methods

TF-IDF. TF-IDF [2] is a well-known unsupervised approach for term weighting based on multiplication of term frequency tf_{ij} (ratio between the number of times the ith word occurs in the jth document and the document size) and inverse document frequency idf_i:

$$tf_{ij} = \frac{t_{ij}}{T_j}, \quad (1)$$

where t_{ij} is the number of times the ith word occurs in the jth document; T_j is the document size (number of the words in the document).

There are different ways to calculate the weight of each word. In this paper we run classification algorithms with the following variants:

1) TF-IDF 1

$$idf_i = \log \frac{|D|}{n_i}, \quad (2)$$

where $|D|$ is the number of document in the training set; n_i is the number of documents that have the ith word;

2) TF-IDF 2.

The formula is given by equation (2) except n_i is calculated as the number of times i^{th} word appears in all documents from the training set.

Confidence Weights (ConfWeight). Maximum Strength (Maxstr) is an alternative method to find the word weights. This approach has been proposed by Soucy and Mineau [3]. It implicitly does feature selection since all frequent words have zero weights. The main idea of the method is that the feature f has a non-zero weight in class c only if the f frequency in documents of the c class is greater than the f frequency in all other classes. The ConfWeight method uses Maxstr as an analog of IDF:

$$ConfWeight_{ij} = \log(tf_{ij} + 1) \cdot Maxstr(i) . \quad (3)$$

Numerical experiments [3] have shown that the ConfWeight method could be more effective than TF-IDF with SVM and k-NN as classification methods. The main drawback of the ConfWeight method is computational complexity. This method is more computationally demanding than TF-IDF method because the ConfWeight method requires time-consuming statistical calculations such as Student distribution calculation and confidence interval definition for each word.

Novel Term Weighting (TW). The main idea of the method [4] is similar to ConfWeight but it is not so time-consuming. The idea is that every word that appears in the article has to contribute some value to the certain class and the class with the biggest value we define as a winner for this article.

For each term we assign a real number term relevance that depends on the frequency in utterances. Term weight is calculated using a modified formula of fuzzy rules relevance estimation for fuzzy classifiers [15]. Membership function has been replaced by word frequency in the current class. The details of the procedure are the following:

Let L be the number of classes; n_i is the number of articles which belong to the ith class; N_{ij} is the number of the jth word occurrence in all articles from the ith class; $T_{ij} = N_{ij} / n_i$ is the relative frequency of the jth word occurrence in the ith class.

$R_j = \max_i T_{ij}$, $S_j = \arg(\max_i T_{ij})$ is the number of class which we assign to the jth word.

The term relevance, C_j, is given by

$$C_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^{L} T_{ji}} \left(R_j - \frac{1}{L-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq S_j}}^{L} T_{ij} \right). \quad (4)$$

C_j is higher if the word occurs more often in one class than if it appears in many classes. We use novel TW as an analog of IDF for text preprocessing.

The learning phase consists of counting the C values for each term; it means that this algorithm uses the statistical information obtained from the training set.

4. Experimental Results

We have considered 4 different text preprocessing methods (2 modifications of TF-IDF, ConfWeight, and the novel TW method) and compared them using different classification algorithms. The methods have been implemented using *RapidMiner* [8]. The classification methods are:

– k-nearest neighbors algorithm with distance weighting (we have varied k from 1 to 15) (k-NN);

– kernel Bayes classifier with Laplace correction (Bayes);

– artificial neural network with error back propagation (standard setting in *RapidMiner*) (ANN);

– linear support vector machine (standard setting in *RapidMiner*) (SVM).

There is no predefined method to search or investigate the constraint values as it heavily depends on the document under test. Some constraint values might work for a specific document with a particular term weighting technique but it might not be effective for another text preprocessing technique for the same document, as a result the task of searching an appropriate constraint value is highly experimental.

The judgment of a constraint value depends on final result (macro F-measure as classification effectiveness criterion) it produces. The approach to investigate these values is to generate as many result files as possible with randomly but sensible chosen values and then comparing results with the results of without constraint.

Keeping this approach in mind, we have generated F-measure result with 10 different constraint values for a specific document with a particular text preprocessing technique. The values were chosen randomly but at the same time if a particular value didn't produce acceptable result another value was put into test. These values are varied from 0,01 to 0,35.

The train and test files for different preprocessing techniques were generated via *Microsoft Visual Studio C++ 2010* and then merged into one train file containing 60 % of train and 40 % of test set which is further used by *RapidMiner* to generate precision and recall result files. Since the size of the Corpus is large the processing or compilation of train files were performed using the computational power of *University of Ulm* Cluster Computers. In the final step precision and recall results are used by F-measure project in *Microsoft Visual Studio C++ 2010* to produce F-measure score. F-measure Score is calculated as it gives another perspective to see our results which in most of the cases overshadow the accuracy result generated by *RapidMiner*.

The numerical results with values of F-measure are presented in tab. 3–7 for each text classification problem. The best results for different values k of k-NN method and for different constraint values are shown. Constraint values are in brackets. Tab. 8 shows the overall comparison of maximum F-measure results with the best techniques, which gives a clear picture whether appropriate results are obtained if constraints are applied or not.

Table 3

The numerical results for *Books*

Term weighting	Without constraint				With constraint			
	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN
TFIDF 1	0,495	0,517 *k* = 3	0,499	0,505	0,516 (0,04)	0,504 *k* = 15 (0,16)	0,527 (0,04)	0,499 (0,04)
TFIDF 2	0,506	0,516 *k* = 1	0,511	0,505	0,508 (0,08)	0,504 *k* = 15 (0,25)	0,525 (0,17)	0,509 (0,06)
ConfWeight	0,238	0,559 *k* = 15	0,238	0,570	0,238 (0,03)	0,544 *k* = 12 (0,05)	0,238 (0,03)	0,546 (0,03)
Novel TW	0,437	0,488 *k* = 14	0,516	0,493	0,238 (0,03)	0,493 *k* = 15 (0,08)	0,490 (0,03)	0,485 (0,03)

Table 4

The numerical results for *Games*

Term weighting	Without constraint				With constraint			
	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN
TFIDF 1	0,652	0,672 *k* = 3	0,665	0,677	0,681 (0,13)	0,693 *k* = 4 (0,01)	0,669 (0,25)	0,687 (0,20)
TFIDF 2	0,651	0,671 *k* = 7	0,661	0,664	0,684 (0,19)	0,696 *k* = 5 (0,16)	0,677 (0,08)	0,679 (0,04)
ConfWeight	0,210	0,720 *k* = 15	0,210	0,717	0,210 (0,03)	0,731 *k* = 14 (0,01)	0,210 (0,03)	0,731 (0,01)
Novel TW	0,675	0,699 *k* = 13	0,675	0,691	0,210 (0,03)	0,695 *k* = 11 (0,03)	0,684 (0,01)	0,675 (0,01)

Table 5

The numerical results for *Debates*

Term weighting	Without constraint				With constraint			
	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN
TFIDF 1	0,637	0,637 *k* = 15	0,642	0,638	0,673 (0,01)	0,675 *k* = 15 (0,13)	0,678 (0,20)	0,680 (0,05)
TFIDF 2	0,639	0,634 *k* = 15	0,640	0,632	0,670 (0,28)	0,671 *k* = 11 (0,03)	0,676 (0,10)	0,678 (0,15)
ConfWeight	0,363	0,695 *k* = 15	0,634	0,705	0,363 (0,01)	0,699 *k* = 13 (0,01)	0,637 (0,01)	0,710 (0,01)
Novel TW	0,616	0,695 *k* = 15	0,702	0,697	0,363 (0,02)	0,694 *k* = 15 (0,02)	0,699 (0,10)	0,698 (0,10)

Table 6

The numerical results for *T1*

Term weighting	Without constraint				With constraint			
	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN
TFIDF 1	0,591	0,816 *k* = 15	0,804	0,830	0,803 (0,01)	0,811 *k* = 11 (0,35)	0,810 (0,18)	0,818 (0,30)
TFIDF 2	0,690	0,808 *k* = 15	0,812	0,808	0,807 (0,35)	0,810 *k* = 15 (0,20)	0,810 (0,30)	0,817 (0,30)
ConfWeight	0,837	0,855 *k* = 14	0,848	0,853	0,529 (0,01)	0,850 *k* = 13 (0,09)	0,835 (0,05)	0,857 (0,01)
Novel TW	0,794	0,837 *k* = 13	0,834	0,854	0,753 (0,05)	0,829 *k* = 12 (0,20)	0,838 (0,25)	0,846 (0,02)

Table 7

The numerical results for *T2*

Term weighting	Without constraint				With constraint			
	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN	Bayes	*k*-NN	SVM	ANN
TFIDF 1	0,844	0,846 *k* = 15	0,846	0,847	0,844 (0,05)	0,846 *k* = 13 (0,17)	0,846 (0,35)	0,847 (0,17)
TFIDF 2	0,842	0,847 *k* = 14	0,846	0,847	0,844 (0,26)	0,846 *k* = 15 (0,20)	0,846 (0,23)	0,847 (0,26)
ConfWeight	0,500	0,825 *k* = 15	0,824	0,829	0,498 (0,01)	0,824 *k* = 14 (0,05)	0,824 (0,01)	0,831 (0,01)
Novel TW	0,777	0,862 *k* = 12	0,859	0,847	0,781 (0,05)	0,862 *k* = 14 (0,05)	0,860 (0,10)	0,862 (0,10)

Table 8

The overall comparison

Problem	Without constraint			With constraint			
	F-measure	Term weighting	Classification algorithm	*F*-measure	Term weighting	Classification algorithm	Constraint
Books	**0,570**	ConfWeight	ANN	0,546	ConfWeight	ANN	0,03
Games	0,720	ConfWeight	*k*-NN (*k* = 15)	**0,731**	ConfWeight	ANN	0,01
Debates	0,705	ConfWeight	ANN	**0,710**	ConfWeight	ANN	0,01
T1	0,855	ConfWeight	*k*-NN (*k* = 14)	**0,857**	ConfWeight	ANN	0,01
T2	0,862	Novel TW	*k*-NN (*k* = 12)	0,862	Novel TW	ANN	0,10

5. Conclusions

Features selection for text classification based on constraints for term weights was investigated with different term weighting method (TF-IDF, Confident Weights, and the Novel TW), different classification algorithms (Bayes classifier, *k*-NN, SVM, and artificial neural network) for different text classification problems (opinion mining, topic categorization). Such features selection provides significant reduction of dimensionality and less computational time for calculations. Besides, the use of constraints for term weights could increase classification effectiveness. We have observed such increase for three out of five problems. In the remaining two problems, no significant change and a decrease of classification effectiveness was observed.

References

1. Joachims T. Learning to classify text using support vector machines: Methods, theory and algorithms. Kluwer Academic Publishers, 2002, p. 205.

2. Salton G. and Buckley C. Term-Weighting Approaches in Automatic Text Retrieval. *Information Processing and Management*. 1988, p. 513–523.

3. Soucy P., Mineau G. W. Beyond TFIDF Weighting for Text Categorization in the Vector Space Model. *Proceedings of the 19th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2005)*. 2005, p. 1130–1135.

4. T. Gasanova R. Sergienko W. Minker E. Semenkin, Zhukov E. A Semi-supervised Approach for Natural Language Call Routing. *Proceedings of the SIGDIAL 2013 Conference*, August 2013, p. 344–348.

5. Gasanova T., Sergienko R., Akhmedova S., Semenkin E., Minker W. Opinion Mining and Topic Categorization with Novel Term Weighting. *ACL 2014*. 2014, p. 84.

6. Gasanova T., Sergienko R., Semenkin E., Minker W. Dimension Reduction with Coevolutionary Genetic Algorithm for Text Classification. *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, Vienna University of Technology, Austria, September 2014, vol. 1, p. 215–222.

7. Potter M. A., De Jong K. A. Cooperative coevolution: an architecture for evolving coadapted subcomponents. Trans. Evolutionary Computation, 8, Jan. 2000, p. 1–29.

8. Shafait F., Reif M., Kofler C., and Breuel T. M. Pattern Recognition Engineering. *RapidMiner Community Meeting and Conference*, 2010, p. 9.

9. DEFT (DÉfi Fouille de Textes). Available at: http://deft.limsi.fr/.

10. European Language Recourses Association. DEFT'08 Evaluation Package. Available at: http://catalog.elra.info/product_info.php?cPath=42_43&products_id=1165.

11. Bechet F., Beze M. E., Torres-Moreno J.-M. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, 2008, p. 27–36.

12. Charnois T., Doucet A., Mathet Y., Rioult F. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, 2008, p. 37–46.

13. Charton E., Camelin N., Acuna-Agost R., Gotab P., Lavalley R., Kessler R., Fernandez S. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, 2008, p. 47–56.

14. Cleuziou G., Poudat C. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, 2008, p. 57–64.

15. Ishibuchi H., Nakashima T., Murata T. Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1999, vol. 29, p. 601–618.

© Sergienko R. B., Shan Ur Rehman M., Khan A. E., Gasanova T. O., Minker W., 2015

UDC 519.85

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 124–130

SELF-CONFIGURING MULTI-STRATEGY GENETIC ALGORITHM FOR NON-STATIONARY ENVIRONMENTS

E. A. Sopov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: evgenysopov@gmail.com

Many real-world problems of design and control in a field of the aerospace lead to optimization problems. Such optimization problems are complicated and become a great challenge to many optimization techniques. Moreover, many real-world optimization problems are dynamic and changing over time. Changes occur in the parameters, objectives and/or problem constraints. In this case, search algorithms should have the capability to track moving optima and adapt to a new environment. In past years many approaches for non-stationary optimization were proposed. The best results are achieved using a stochastic population-based search such as evolutionary and genetic algorithms. Unfortunately, real-world non-stationary optimization problems include various types of changes and are poorly predictable, thus there is a problem of choosing a proper optimization technique and tuning its parameters. This study presents a novel approach for designing a multi-strategy genetic algorithm based on a hybrid of the island model, cooperative and competitive coevolution schemes. The approach controls interactions of different genetic algorithms and leads to the self-configuring solving of problems with a priori unknown structure. A short survey on non-stationary optimization problem and methods is presented. The results of numerical experiments for benchmark problems from the CEC competition are discussed. The proposed approach has demonstrated efficiency comparable with other well-studied techniques for non-stationary optimization. And it has significant advantage – it does not require the participation of the human-expert, because it operates in an automated, self-configuring way.

Keywords: dynamic optimization, non-stationary environment, self-configuring, genetic algorithm, coevolution.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 124–130

САМОКОНФИГУРИРУЕМЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ НА БАЗЕ МНОЖЕСТВА СТРАТЕГИЙ ПОИСКА В НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЕ

Е. А. Сопов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: evgenysopov@gmail.com

Многие практические задачи проектирования и управления в аэрокосмической отрасли приводят к задачам оптимизации. Подобные задачи являются сложными и затрудняют применение многих методов оптимизации. Более того, многие практические задачи оптимизации являются динамическими и меняются с течением времени. Изменения происходят в параметрах задачи, целевых функциях и/или ограничениях. В этом случае алгоритмы оптимизации должны иметь возможность отслеживать меняющие положение оптимумы и постоянно адаптироваться к новой среде. Ранее было предложено множество подходов для решения задач нестационарной оптимизации. Наилучшие результаты демонстрируют стохастические популяционные алгоритмы, такие как эволюционные и генетические алгоритмы. Представлен новый подход для проектирования генетического алгоритма, включающего множество стратегий поиска, который основан на гибридизации островной модели, кооперативной и конкурирующей коэволюционных схем. Такой подход осуществляет управление взаимодействием многих генетических алгоритмов, что приводит к самоконфигурируемому решению задач оптимизации с априори неизвестной структурой. Представлен краткий обзор проблемы и методов решения задач нестационарной оптимизации. Приводится анализ результатов численных экспериментов на множестве задач, представленных на соревновании по нестационарной оптимизации в рамках международной конференции CEC. Предложенный подход демонстрирует эффективность, сравнимую с другими хорошо изученными подходами для решения задач нестационарной оптимизации. При этом подход имеет существенное преимущество – он не требует привлечения специалиста, так как является самоконфигурируемым и решает задачу оптимизации в автоматизированном режиме.

Ключевые слова: динамическая оптимизация, нестационарная оптимизация, самоконфигурация, генетический алгоритм, коэволюция.

Introduction. Many real-world optimization problems are non-stationary. Changes in the environment can take various forms such as changes in the parameters, objectives or problem constraints. As a result, in such dynamic environments the position of the global and local optima changes. This feature is called the optima drift. Non-stationary optimization problems are also called dynamic optimization problems (DOP) or changing (non-stationary, dynamic) environment optimization [1].

There exist many examples of real-world problems in a field of the aerospace, that are non-stationary. For example, the problem of fuel mixture optimization for jet engines. The dependence of the engine output on the mixture quality changes over time due to degradation of engine components or with component failure. When planning routes of civil aviation, as well as planning landings and takeoffs, it is often required to design a new plan on the fly, for example when the original plan changes or there are changes of weather conditions, etc.

Other examples from other areas are for example in game theory with a change of opponent strategy, in job shop scheduling problems with the addition of a new job, in financial problems with changes in markets, in speech recognition with changes in the acoustic environment, etc.

In the field of mathematical optimization, there exists framework for modelling optimization problems that involve uncertainty. It is called stochastic programming. Stochastic programming is based on a fact that the probability distributions of optimization model parameters are known or can be estimated. In real-world applications, the nature of non-stationarity is not known beforehand, and often is not stochastic. Thus, search optimization methods are preferred and are often the only ones applicable.

In the case of stationary optimization, the main goal is to find the optimal solution to the problem (fig. 1). The efficiency criteria for optimization algorithms are accuracy and the number of objective evaluations (or computational cost).

In the case of non-stationary optimization, the position of optima is changing over time, so the search algorithm should have the capability to track moving optima and adapt to a new environment. Efficiency criteria are accuracy and adaptation speed. Unfortunately, standard search optimization methods are not able to adapt to changes. Moreover, they converge to the best-found solution and lose the previously collected information about search space (fig. 2).

It is obvious that the traditional optimization techniques are not efficient enough with non-stationary problems. Many researchers prefer the population-based approaches that are able to track the optimum position more efficiently as the search involves several parallel solutions. The best results for DOP are achieved using nature-inspired algorithms [2].

Related work. A non-stationary optimization problem or DOP can be defined as:

$$f(\overline{x},t) \to \underset{\overline{x} \in D(t)}{extr},$$

$$g_i(\overline{x},t) \le 0, i = \overline{1,q},$$

$$h_i(\overline{x},t) = 0, i = \overline{q+1,m},$$

$$\overline{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_N) \in D(t), D(t) \subseteq S, f : D \to R, t \in T,$$

where S is the search space; $D(t)$ is a set of feasible solutions, constrained with g_i and h_i; t is the time.

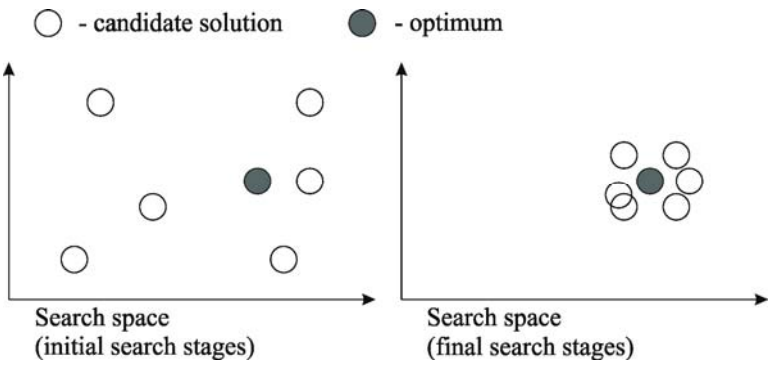


Fig. 1. Search algorithm converges to optimum

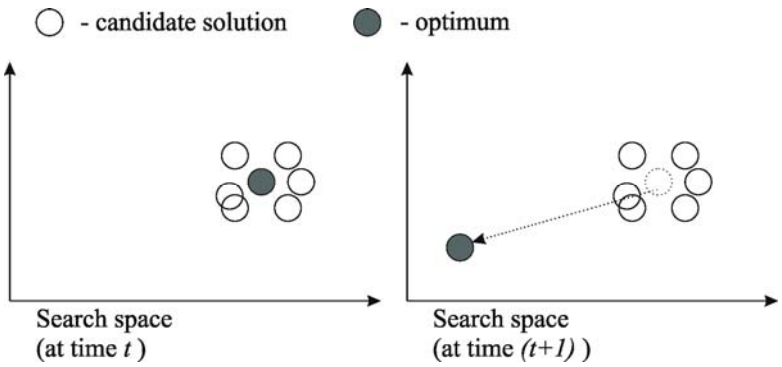


Fig. 2. Environment has changed and optimum has moved

In such a problem statement, the objective and the constraints depend on the solution vector $\overline{x}$ and on the certain value of time *t*. This means that the objective and the feasible region of the search space are both changing over time. However, the problem can be considered as a unique stationary problem at each fixed point of time.

The solution to the problem of non-stationary optimization is a set of global optima for all values of time (in a case of minimization):

$$\overline{x}^*(t) = \left\{\overline{x} \in D(t) | \forall \overline{x}' \in D(t), f(\overline{x}, t) \le f(\overline{x}', t)\right\}, t \in T,$$

where $\overline{x}^*$ is the global optimum value.

A good survey on DOP methods is proposed in [3]. The range of search techniques is rather wide and contains:

- evolutionary and genetic algorithms (EA and GA);
- evolutionary strategies (ES);
- evolutionary programming (EP);
- cooperative strategies (CS);
- cultural algorithms;
- swarm intelligence (PSO);
- estimation-of-distribution algorithms (EDA);
- immune-based algorithms;
- memetic algorithms;
- ant colony optimization;
- self-organizing scouts;
- neural networks;
- other techniques.

It should be noted that a large proportion of works and of the better results are related to evolutionary algorithms. Other approaches are good in some specific applications.

There exist the following types of environment changes that define certain non-stationary optimization problem [4]:

1. *Coordinate transformations* lead to a new position of optima. Values and the structure of optima do not change. There are the following coordinate transformations:

– *Drifting landscape*. The whole landscape moves in some direction with a constant, variable or random speed value;

– *Rotating landscape*. The landscape is rotating around a point in the search space;

– *Chaotic coordinate changes*.

2. *Landscape rescaling* leads to changes of objective values while maintaining the overall structure of optima. Values may either increase (swelling) or decrease (shrinking).

3. *Landscape stretching* leads to landscape topology changes while maintaining the overall positions of optima.

A known specialist in the field of non-stationary optimization, Shengxiang Yang, notes that most real-world optimization problems have the following properties [5]:

- DOPs are non time-linkage problems;
- changes are assumed to be detectable;
- coordinates and topology are changing;
- DOPs have unpredictable changes;
- DOPs have cyclic/recurrent changes.

Standard evolutionary algorithms have no features that provide adaptation to environment changes. Thus, researchers use different heuristics. There are two main approaches: maintaining the diversity of population and memorizing past search experience. Known techniques include the following:

1. Restarting optimization. If a change in the environment is detected, the search is restarted. As a restart leads to a completely new optimization, there is no influence of a certain change type.

2. Local adaptation. If only slight changes occur, it is reasonable to use local operators to create new solutions in the local region of the current individuals. Most of the known approaches uses a modified mutation operator, for example hypermutation, variable local search (VLS), distance-based mutation in the multinational GA and others. Another way is to use the external local search procedure.

3. Memorizing previous solutions. In a case of time-dependent changes, new landscapes can become very similar to previous ones, so it is a good idea is to memorize previous solutions to guide the search to those previously explored regions in the search space. There are two different approaches: explicit and implicit memory techniques.

The explicit memory uses external storage for previous candidate solutions that can be reevaluated and reinserted into the population if a change in the environment occurs. The implicit memory uses the concept of the diploid chromosomes which contain two sets of genes encoding the solution. Only one set participates in selection and reproduction, and this set is called dominant set. If a change occurs, the dominance of the sets is reevaluated and the dominant set can be substituted by the redundant part of chromosome.

4. Diversity increasing techniques. Almost every approach in the field of DOP focuses on the maintenance of genetic diversity in the population. There are at least three groups of special techniques.

The first technique increases diversity by introducing random individuals into the population with each generation. This group includes random immigrants, partial hypermutation and hypermutation techniques. The second group is niching techniques. The main idea is to decrease the fitness value for solutions if some local region (called the niche) around them contains other individuals. The third group uses the idea of restricted mating. The population is divided into several subpopulations. The recombination operator is restricted to individuals of the same subpopulation. A more simple way is to restrict the recombination of the closest individuals.

5. Multi-population techniques. The population is divided into competing subpopulations. Each subpopulation responds for a particular region of the search space or may have its own goal. Subpopulations may interact to improve the search. This approach combines diversity, memory and adaptation mechanism. The implementation of the multi-population technique depends on the particular optimization problem that leads to a specific partition of the population and specific goals of subpopulations.

6. Self-adaptive techniques. Self-adaptation is very popular and successful in stationary optimization. In DOP,

the adaption involves learning from past experience. The term "self-adaptation" means that control parameters of evolutionary algorithm are encoded in the chromosome with the representation of the solution. Thus, the evolutionary algorithm implements the search for a solution of the original problem and the adjustment of the algorithm parameters under the current search situation.

7. Algorithms with overlapping generations. A standard evolutionary algorithm forms a new population with every next generation. The previous population is eliminated, but the search experience is saved in implicit form in the genes of the current population. In DOP, better results are obtained with the steady-state model instead of the generational model. The steady-state model uses only a small part of the population (usually only two solutions) on each iteration to reproduce a small number of new solutions.

8. Learning of the underlying dynamics. Many future changes in the environment can be predicted using information about previous changes and the current situation. It is reasonable to use this information to adapt the search according to predictions. Cyclic changes can be predicted in an implicit form using memory techniques. However, arbitrary changes require the development of some external procedures that can be trained on historical data. There exists many approaches using mathematics, statistics or machine learning.

Prediction-based algorithms have disadvantages, mostly due to training errors. The algorithms may need a relatively large set of training data to produce good results, so it means that the prediction can be started after sufficient training data has been collected. If the algorithm has not performed successfully in the previous change periods, the historical data collected by the algorithm might provide the wrong training data. Moreover, not all types of changes can be predicted.

The main disadvantage of dynamics modelling is that this approach uses techniques different from evolutionary algorithms. Choosing the correct method for analysis and predicting the dynamics of changes, their training and implementation are complex problems themselves, comparable in complexity to the original optimization problem.

The experimental investigation of different techniques shows that there is no universal approach to adapt to all types of changes in the environment. As mentioned above, real-world problems of non-stationary optimization include various types of changes and are poorly predictable. Moreover, even if the type of changes is a priori known, one should select the proper structure of evolutionary algorithm and fine tune its parameters.

Thus, there is an actual scientific problem of designing self-configuring techniques that are able to deal with many types of changes in the environment.

Self-configuring multi-strategy genetic algorithm. In the field of statistics and machine learning, ensemble methods are used to improve decision making. On average, the collective solution of multiple algorithms provides better performance than could be obtained from any of the constituent algorithms. This concept can be used in the field of EA. The main idea is to include different search strategies in the ensemble and to design effective control of algorithm interaction.

There are at least two well-studied approaches to the interaction of an EA: the coevolutionary approach and the island model.

The island model was introduced as a parallel version of an EA. In a parallel implementation of the island model, each machine executes an EA and maintains its own population for search. The machines periodically exchange a portion of their populations (it is called migration). In a case of separable search problems, the island model performs better results than the serial single population model.

The coevolution algorithm is an evolutionary algorithm in which fitness evaluation is based on interactions between individuals. The interaction can take place in a single population or in multiple populations, where each population can be processed by its own EA. There are two types of interaction: competitive and cooperative. Usually the coevolution is referred to problem decomposition, and the cooperative scheme is applied.

Coevolution can also be applied to perform the self-configuring. It is known that an EA has many parameters to be tuned. The incorrect values of the parameters lead to low efficiency of the algorithm. The self-configuring coevolutionary algorithm is a hybrid of the island model, competitive and cooperative coevolution. The total population is divided into disjoint subpopulations of equal size. The portion of the population is called the computational resource. Each subpopulation corresponds to certain EA with its own parameters values and evolves independently (corresponds to the island model). After some period, the performance of individual algorithms is estimated and the computational resource is redistributed. EAs with better performance increase their population size (the competitive scheme). Finally, random migrations of the best solutions are presented to equate start positions of EAs for the run with the next period (the cooperative scheme). Such a coevolution technique eliminates the necessity to define an appropriate algorithm for the problem as the choice of the best algorithm is performed automatically during the run [6; 7].

In [8; 9] a new self-configuring coevolutionary technique was introduced. It is based on the idea mentioned previously, but it uses many different search strategies instead of the only EA. The approach was designed and then investigated with complex multi-objective optimization problems. It was called the self-configuring coevolutionary multi-objective genetic algorithm or SelfCO-MOGA.

This work presents a novel multi-strategy approach to non-stationary optimization, which is called in a similar way the self-configuring DOP genetic algorithm or Self-DOPGA. The main idea is to include in the self-configuring coevolutionary algorithm many search strategies, which can deal with many different types of changes in the environment. The competitive interaction should lead to an automated choice of the proper DOP algorithm. The cooperative interaction should supply all algorithms with useful information about past search experience collected and is presented in different forms.

In this work, all EAs are assumed to be genetic algorithms with binary representation. GAs are a well-studied technique, so many efficient algorithms can be used as

core algorithms for DOP approaches [10; 11]. The binary GA allows to deal with problems that contain variables of various types (real, integer, Boolean, rank values, permutation, etc.).

The general SelfDOPGA scheme is as follows:

Step 1. Define a set of algorithms included in the coevolution.

Step 2. Perform algorithms run over some time until a change in the environment is observed.

Step 3. Estimate the performance for each algorithm over the period.

Step 4. Redistribute the computational resources and perform a new run (go to the step 2).

We will discuss the SelfDOPGA steps in detail.

The first step defines the search strategies. Any combination of DOP algorithms can be included in SelfDOPGA. The combination can be designed using a priori information about certain problem. Otherwise, different (or all available) strategies should be included. In this work, we will use the following list of DOP techniques (varied parameters are shown in brackets):

– Self-adaptive technique (probabilistic GA with self-configuring parameters);

– Restarting optimization (the percentage of the population that is substituted with new randomly generated individuals);

– Local adaptation (the distance-based mutation rate in multinational GA);

– Diversity increasing technique (the size of niche);

– The explicit memory (the size of external storage).

Some the techniques mentioned above were excluded. For example, the multi-population technique is already presented by different populations in the multi-national GA. Populations of GAs in the SelfDOPGA are also different as GAs use different search strategies. The dynamics modelling uses techniques different from evolutionary algorithms, so it cannot be applied in a form of the coevolution.

The second step is the running of algorithms until a change in the environment is observed. Detection of changes can be performed by re-evaluating the fitness of specific solutions (called detectors). The detector can be the current best individual. Also changes can be detected by analysis of algorithm behaviour (in the case the current best was out of the optima). Changes are detected based on monitoring the drop in value of the average of the best-found solutions over a number of generations.

The third step is performance estimation. The performance measure is the offline error [12], which is the average error at every time step over the best solution found by the algorithm since the last change in the environments:

$$OfflineError_i = \frac{1}{T_p}\sum_{t=1}^{T_p} fitness(x_{best}(t),t)\ ,$$

where T_p is the number of generations between two consequent changes; $x_{best}(t)$ is the best individual in a population at moment t and i is number of the algorithm.

The fourth step performs the redistribution of populations. All algorithms give to the "winner" algorithm a certain percentage of their population size. Each algorithm has a minimum guaranteed resource that is not distributed.

Experimental results. To investigate the performance of the SelfDOPGA, two test problems are used: the moving peaks benchmark (MPB) and the dynamic Rastrigin function. The MPB is the standard for testing DOP algorithms, as it is thought to be a simulation of various real-world optimization problems. The static Rastrigin function is a complex optimization problem with a large number of deceptive local optima. The dynamic version of the Rastrigin function simulates a complex dynamic problem. Both problems are well-studied, so we can compare the performance with many DOP techniques [12–14].

The MPB defines an n-dimensional landscape with a pre-set number of peaks (p). Peaks are defined with specific locations (denoted as X), heights (H) and widths (W). The peaks are distributed randomly in a pre-defined area. Peaks may vary its height, width and location over time. The fitness function for the MPB is formulated as follows:

$$f_{\mathrm{MPB}}(\bar{x},t) = \max_{i=1,\dots,p}\left(\frac{H_i(t)}{1+W_i(t)\cdot\sum_{j=1}^{n}(x_j - X_j(t))^2}\right).$$

A shift of a single peak can be defined as:

$$X_i(t) = X_i(t-1) + v_i(t)\ ,$$

$$v_i(t) = \frac{s}{\left|r + v_i(t-1)\right|}((1-\lambda)\cdot r + \lambda\cdot v_i(t-1))\ ,$$

where r is a random shift vector; s is a parameter regulating the length of the movement (the severity). A parameter λ sets a balance between the random and directed movement. The value of λ = 0.0 results in a completely random direction of movement. The value of λ = 1.0 makes every move direction depend on the direction of the previous move.

The set of the MPB parameters is called the "scenario". The majority of the research in the field of non-stationary optimization uses Scenario 2 (tab. 1) [15].

Table 1

Parameter settings for MPB

Parameter	Settings
Dimensions (n)	5
Coordinates range ($x_{\min}$, $x_{\max}$)	[0,100]
Peak heights (H)	[30,70]
Peaks widths (W)	[1,12]
Evaluations between changes	5000
The severity (s)	1.0
Correlation coefficient (λ)	0.0

The dynamic Rastrigin function is defined as follows:

$$f_{Rastrigin}(\bar{x},t) =$$

$$= \sum_{i=1}^{D}\left[(x_i + \Delta(t))^2 - 10\cos(2\pi x_i + 2\pi\Delta(t)) + 10\right],$$

where $x_i \in [-5.12, 5.12]$; $\Delta(t)$ is a random number changed over times within $[-0.8, 0.8]$.

The SelfDOPGA settings are:

– Population size – 500 (all algorithms start with 100 individuals);

– Chromosome length (the MPB) – 80 bits (discretization step is 1.5×10^{-3});

– Chromosome length (dynamic Rastrigin function) – 10 bits per a dimension (discretization step is 10^{-2});

– All results are the averages of 100 independent runs;

– All algorithms are self-configuring in a way described in [11];

– The size of external storage for the explicit memory technique – 20.

The results of numerical experiments are shown in tab. 2 and 3. The results of the SelfDOPGA runs are compared with the performance of 5 individual algorithms and its average.

Table 2

Offline error for the MPB

Algorithm	$p = 1$	$p = 5$	$p = 10$	$p = 20$
Self-adaptive	0.5	3.27	9.96	8.72
Restarting optimization	1.25	5.03	10.87	9.35
Local adaptation	0.96	4.85	10.84	11.5
Diversity increasing	0.4	3.93	9.01	7.97
The explicit memory	1.98	7.63	16.25	17.82
Average	1.018	4.942	11.386	11.072
SelfDOPGA	0.82	4.56	7.12	7.33

Table 3

Offline error for dynamic Rastrigin function

Algorithm	$D = 2$	$D = 5$	$D = 10$
Self-adaptive	0	3.56	14.53
Restarting optimization	0	4.02	15.01
Local adaptation	0	6.74	21.23
Diversity increasing	0.7	6.87	21.8
The explicit memory	1.3	8.15	34.36
Average	0.4	5.868	21.386
SelfDOPGA	0	2.83	11.56

As we can see, the SelfDOPGA shows better performance that the average performance of individual techniques. The most significant difference is observed in complex problems with higher dimensionality. In the case of low dimensionality, the SelfDOPGA yields to the best algorithm. The memory approach shows low performance, because changes are not cyclic, but random.

Although there is a single technique that is better or equal to the performance of the SelfDOPGA, the choice of the appropriate algorithm requires the problem analysis. The SelfDOPGA does not use any a priori information about a problem and controls the search strategy automatically during the run.

Conclusions. Optimization in a changing environment is a complex problem. In many real-world problems, the changes are random and their types are unknown beforehand. There exists a great variety of search strategies that are efficient with a specific type of changes.

In this work, the self-configuring DOP genetic algorithm with a multiple strategy ensemble is proposed. The combination of competitive and cooperative coevolution schemes is used to control search strategies interaction. The SelfDOPGA has better performance than the average performance of individual algorithms and performs automatically in an adaptive way.

In further works, the SelfDOPGA should be extended with other DOP techniques. More non-stationary problems with different types of changes should be tested.

Acknowledgements. This research is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the State assignment № 2.1889.2014/K. The author expresses his gratitude to Mr. Ashley Whitfield for his efforts to improve the text of this article.

Благодарности. Исследования поддерживаются Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках государственного проектного задания № 2.1889.2014/К. Автор выражает признательность Эшли Уитфильду за помощь в совершенствовании текста статьи.

References

1. Yang S., Jin Y. Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007, 605 p.

2. Nguyena T.T., Yang S., Branke, J. Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art. Swarm and Evolutionary Computation 6, 2012, p. 1–24.

3. Cruz C., González J. R., Pelta D. Optimization in dynamic environments: a survey on problems, methods and measures. *Soft Computing*, Springer-Verlag, 2011, no. 15 (7), p. 1427–1448.

4. Weicker K. Evolutionary Algorithms and Dynamic Optimization Problems. Ph.D. dissertation thesis, Der Andere Verlag, 2003, 211 p.

5. Yang, S., Evolutionary Computation for Dynamic Optimization Problems. Tutorial, GECCO'13, 2013, p. 667–682.

6. Goh C.-K., Tan K. C. A competitive–cooperative coevolutionary paradigm for dynamic multiobjective optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009, no. 13(1), p. 109–127.

7. Ivanov I., Sopov E. [Self-configured genetic algorithm for multi-objective decision making support]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 1(47), p. 30–35 (In Russ.).

8. Ivanov I., Sopov E. [Investigation of the self-configured coevolutionary algorithm for complex multi-objective optimization problem solving]. *Sistemy Upravleniya i Informatsionnye Tekhnologii*. 2013, no. 1.1(51), p. 141–146 (In Russ.).

9. Ivanov I., Sopov E. Design Efficient Technologies for Context Image Analysis in Dialog HCI Using Self-Configuring Novelty Search Genetic Algorithm. In the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO'14. Vienna, Austria, 2014, p. 832–839.

10. Sopov E. A., Sopov S. A. The convergence prediction method for genetic and PBIL-like algorithms with binary representation. *Proceeding of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON'11)*, Tomsk, 2011, p. 203–206.

11. Semenkin E. S., Semenkina M. E. Self-configuring Genetic Algorithm with Modified Uniform

Crossover Operator. Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science 7331. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, p. 414–421.

12. Branke J., Schmeck H. Designing evolutionary algorithms for dynamic optimization problems. Theory and Application of Evolutionary Computation: Recent Trends, Springer-Verlag, 2002, p. 239–262.

13. Morrison R. W., De Jong K. A. A test problem generator for non-stationary environments. Proc. the 1999 Congr. on Evol. Comput., 1999, p. 2047–2053.

14. Li C., Yang S., Nguyen T.T. et al. Benchmark Generator for CEC2009 Competition on Dynamic Optimization, Technical Report 2008, Department of Computer Science, University of Leicester, U.K., 2008, 14 p.

15. Branke J., Memory enhanced evolutionary algorithms for changing optimization problems. In Proc. the Congr. on Evol. Comput, 1999, p. 1875–1882.

Библиографические ссылки

1. Yang S., Jin Y. Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007, 605 p.

2. Nguyena T. T., Yang S., Branke J. Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art // Swarm and Evolutionary Computation. 2012. № 6. Pp. 1–24.

3. Cruz C., González J. R., Pelta D. Optimization in dynamic environments: a survey on problems, methods and measures // *Soft Computing*. 2011. № 15 (7). Pp. 1427–1448.

4. Weicker K. Evolutionary Algorithms and Dynamic Optimization Problems : Ph. D. dissertation thesis. Der Andere Verlag, 2003. 211 p.

5. Yang S. Evolutionary Computation for Dynamic Optimization Problems // Tutorial, GECCO'13. 2013. Pp. 667–682.

6. Goh C.-K., Tan K. C. A competitive–cooperative coevolutionary paradigm for dynamic multiobjective optimization // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2009. № 13(1). Pp. 109–127.

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

8. Иванов И., Сопов Е. Исследование эффективности самоконфигурируемого коэволюционного алгоритма решения сложных задач многокритериальной оптимизации // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 1.1 (51). С. 141–146.

9. Ivanov I., Sopov E. Design Efficient Technologies for Context Image Analysis in Dialog HCI Using Self-Configuring Novelty Search Genetic Algorithm // In the 11th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO'14. Vienna, Austria, 2014. Pp. 832–839.

10. Sopov E. A., Sopov S. A. The convergence prediction method for genetic and PBIL-like algorithms with binary representation // *Proceeding of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON'11)*. Tomsk, 2011. Pp. 203–206.

11. Semenkin E. S., Semenkina M. E. Self-configuring Genetic Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator. Advances in Swarm Intelligence // Lecture Notes in Computer Science 7331. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. Pp. 414–421.

12. Branke J., Schmeck H. Designing evolutionary algorithms for dynamic optimization problems. Theory and Application of Evolutionary Computation: Recent Trends. Springer-Verlag, 2002. Pp. 239–262.

13. Morrison R. W., De Jong K. A. A test problem generator for non-stationary environments // Proc. the 1999 Congr. on Evol. Comput. 1999. Pp. 2047–2053.

14. Benchmark Generator for CEC2009 Competition on Dynamic Optimization / C. Li [et al.] // Technical Report 2008. Department of Computer Science, University of Leicester, 2008. 14 p.

15. Branke J. Memory enhanced evolutionary algorithms for changing optimization problems // In Proc. the Congr. on Evol. Comput. 1999. Pp. 1875–1882.

© Sopov E. A., 2015

UDC 519.87

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 131–136

SELF-CONFIGURING HYBRID EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR MULTI-CLASS UNBALANCED DATASETS

V. V. Stanovov*, O. E. Semenkina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
*E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru

This paper describes a modification of the self-configuring hybrid evolutionary algorithm for solving classification problems. The algorithm implements a hybridization of Pittsburg and Michigan approaches, where Michigan part is used together with mutation operator. The rule bases use fixed fuzzy terms, and the number of rules in the rule base can change during the algorithm run. Also, the applied algorithm uses a set of heuristics to determine the weights and class labels for every fuzzy rule, using the confidence values, which are calculated using the training sample. A special initialization procedure allows getting more accurate fuzzy rule bases on the first generations. The modification changes the procedure of determining the most appropriate class number for the fuzzy rule. It uses the number of instances of different classes, as a weighting coefficient to avoid confidence values bias. Also, we apply two classification quality measures, the classical accuracy value and the average accuracy among classes. The modification, combined with different classification quality measures, allows improvement in the classification results. The self-configuring algorithm is tested on a set of unbalanced classification problems with several classes using cross-validation and a stratified sampling procedure. The test problems included image segment classification, bank client classification, phoneme recognition, classification of page contents, and satellite image classification. For one of the problems, the confusion matrixes are provided to show the increasing balance over the class accuracies. The presented method has efficiently solved the satellite images classification problem and can be applied for many real-life problems, including the problems from aerospace area.

Keywords: fuzzy classification system, unbalanced data, evolutionary algorithm, self-configuration.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 131–136

САМОКОНФИГУРИРУЕМЫЙ ГИБРИДНЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ЗАДАЧ С НЕСБАЛАНСИРОВАННЫМИ ДАННЫМИ И МНОЖЕСТВОМ КЛАССОВ

В. В. Становов*, О. Э. Семенкина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru

Рассматривается модификация самоконфигурируемого гибридного эволюционного алгоритма для решения задач классификации. В алгоритме реализована гибридизация Питсбургского и Мичиганского подходов, где Мичиганская часть используется вместе с оператором мутации. Базы правил используют фиксированные нечеткие термы, а число правил в базе может меняться в ходе работы алгоритма. Также примененный алгоритм использует набор эвристик для определения весов и номеров классов для каждого нечеткого правила с использованием значений достоверности (confidence), которые рассчитываются по обучающей выборке. Особая процедура инициализации позволяет получать более точные нечеткие базы правил на первых поколениях. Модификация изменяет процедуру определения наиболее подходящего номера класса для нечеткого правила. Она использует число объектов различных классов в качестве весовых коэффициентов, чтобы избежать смещения значений достоверности. Модификация в комбинации с другими мерами качества классификации позволяет улучшить результаты классификации. Самоконфигурируемый алгоритм был протестирован на ряде задач классификации с несбалансированными данными и несколькими классами с применением процедуры кросс-валидации и стратифицированным разбиением выборки. Тестовые задачи включали классификацию сегментов изображения, классификацию клиентов банка, распознавание фонем, классификацию содержимого страниц и классификацию снимков со спутника. Для одной из задач были приведены матрицы ошибок, для того чтобы показать увеличение баланса точности по классам. Представленный подход успешно решил задачу классификации снимков со спутника и может быть применен для множества реальных задач, включая задачи из аэрокосмической области.

Ключевые слова: нечеткие системы классификации, несбалансированные данные, эволюционный алгоритм, самоконфигурирование.

Introduction. Classification problems are typical problems for data analysis, and a vast number of approaches and techniques have been proposed to solve them. These techniques, such as, for example, artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVM) and genetic programming (GP) might show very good results on some datasets, but there are still some problems to be resolved. These include processing big datasets with many instances, feature selection problems, missing values, and so on. Among them, there is also the problem of unbalanced data; it has been recently said to be one of the main obstacles preventing good classification results [1; 2].

The imbalance in classification datasets means that the number of instances of different classes is not the same for all classes. For example, for two-class datasets, this problem occurs when the number of instances of one class is much lower than the number of instances of the other class. The class that has more instances is called the majority class, while the other one is called the minority class. The higher the unbalance ratio is, the more difficult the classification problem becomes.

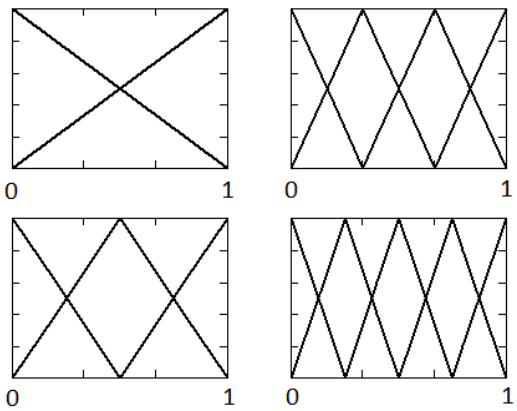
During the classifier learning process, especially when learning is conducted by evolutionary algorithms, this unbalance may lead to bias in classification results. That means that the classifier focuses on the majority class, and most of its instances are classified correctly, while the minority class is classified incorrectly. The reason for this is the learning procedure, and basically the classification quality criterion, which in most cases is simply the overall accuracy on the whole dataset. Although the overall accuracy may seem to be high, actually only the majority class may be classified correctly, so that for unbalanced datasets accuracy cannot be an adequate criterion. One more important thing is that in the vast number of real-world problems the minority class is the class-of-interest for the researcher; classifying it correctly is actually solving the problem.

The known methods for dealing with unbalance problems are divided into two groups: external and internal approaches. External approaches are used to change the learning sample so that it becomes balanced; these approaches use some sampling methods and can be very helpful in some situations. Yet in this paper we will focus on internal approaches, which are used to change the learning criterion so that it takes the unbalance ratio into account. Moreover, we will introduce the different modified initialization procedure for the algorithm that we used in our previous works.

Hybrid fuzzy evolutionary algorithm. The algorithm used in this work is based on ideas by Ishibuchi [3; 4], and the main idea of learning fuzzy classifiers from data was presented by Wang and Mendel [5]. This algorithm combines the Pittsburg and Michigan approaches for evolutionary classifier learning so that the Michigan-style algorithm is used as a mutation operator. We will give a short description of the main features of this algorithm here.

Each individual in the population is a rule base and the number of rules is not fixed, although the maximum number of rules cannot be exceeded. Each rule is an integer string with numbers from [0, 14], each meaning the number of a certain fuzzy set. For each variable several fuzzy partitions are used as shown in picture. There are 4 partitions into 2, 3, 4, and 5 fuzzy sets. Also the “don’t care” term is used and named as a zero fuzzy set. During the fuzzy inference procedure the “don’t care” condition always returned the membership function value equal to 1, whatever the value of the variable is. There are also possible some other approaches for setting the fuzzy partitions, for example, 2-tuples representation [6].

There are two types of selection used (rank and tournament), one crossover operator and three mutation operators (weak, medium and strong). The tournament size was equal to 3, and the mutation probability depended on the number of rules in the rule base. After the mutation operator, the Michigan part is applied to each rule base, so that each rule in it is an individual. There are three types of Michigan operators that could be applied to the rules in the base. The first one adds new rules, if the size of the rule base was not exceeded, the second deletes the worst rules from the base, and the third firstly deletes rules and then adds new rules into the base. Adding new rules is performed by heuristic and genetic approaches. The heuristic approach generates new rules from the misclassified instances, and the genetic approach generates rules from existing ones by genetic operators.



Four fuzzy partitions used in the algorithm

For selection, mutation, the Michigan part and the type of rules adding the self-configuration procedure described in [7; 8] is applied. This self-configuration is based on the success rates of the operators, calculated using the fitness improvements.

For each rule the class number and the rule weight are calculated, and these values are not coded in the chromosome, but determined heuristically. The confidence value is used in both cases so we used the approaches proposed in [9]. During the initialization procedure, after the antecedent parts of rules are set at random, the confidence value for the new rule is calculated as follows:

$$Conf(A_q \to \text{Class}\, k) = \frac{\sum_{x_p \in \text{Class}\, k} \mu_{A_q}(x_p)}{\sum_{p=1}^{m} \mu_{A_q}(x_p)},$$

where $\mu_{A_q}(x_p)$ is the membership function value for instance x_p and antecedent part A_q. In the original algorithm, the class number having the highest confidence

value was attached to the rule, but for unbalanced datasets, the confidence values become biased as they calculate the sum of membership functions over all instances of every class. This means that for the minority class the confidence values can be smaller not because the rule covers the instances of this class worse than the majority class, but simply because the number of instances is not balanced. This leads to the problem that most of the generated rules are tied with the majority class, although they may describe an important part of the minority class.

To avoid this bias, a modified procedure of class number definition is proposed, which uses the number of class instances for every class as a weight:

$$\text{Class } q = \arg\max_k \left(\frac{Conf(A_q \to \text{Class } k)}{m_k} \cdot m\right),$$

where m_k is the number of instances in class *k*. This modification is supposed to improve classification quality and accuracy in case of unbalanced datasets. For the balanced datasets, this equation does not change the results of choosing the class number.

***Acc* and *Ave* values for estimating the classification quality.** The typical approach for the estimation of classification quality is a use of the accuracy, as has been said previously. The overall accuracy, *Acc* is determined as the number of incorrectly classified instances, or instances that were not classified anywhere, divided by the total number of instances in the learning sample. The other way of estimating the classification quality is by calculating the accuracy separately for every class. The accuracies on all classes are summed and then divided by the number of classes, resulting in the *Ave* measure. The following two equations are provided to formally describe these measures:

$$Acc = \frac{\sum_{i=0}^{k} E_i}{\sum_{i=0}^{k} m_i},,$$

$$Ave = \sum_{i=0}^{k} \frac{E_i}{m_i \cdot k},$$

where E_i is the number of errors of the classifier for the *i*-th true class. Although the *Ave* measure is not the only one used for unbalanced datasets, it is simple enough and allows significant improvement in the classification quality as will be shown later. The *Ave* measure can be also used as a quality criterion in other algorithms, for example, for algorithms that automatically design artificial neural networks [10; 11] or support vector machines [12]. Also, each part of the sum in *Ave* measure equation can be used as a separate quality criterion in a multi-objective algorithm for automated design of ANNs [13] or other machine learning techniques. The fitness function was a combination of three parameters – *Acc* or *Ave* value, number of rules and total length of all the rules in the base. Some other approaches apply multi-objective methods, which can be very helpful [14].

Algorithm testing and results. To see how the algorithm performs on complex classification problems, we have chosen some problems from the UCI Machine Learning Repository [15] and used four algorithm configurations: with modified class definition and without, with *Acc* and with *Ave* as the main quality estimation used in the fitness function.

The problems on which we tested the algorithms are the following:

1. Page-blocks, 5472 instances, 10 variables, 5 classes.
2. German credit, 1000 instances, 24 variables, 2 classes.
3. Phoneme, 5404 instances, 5 variables, 2 classes.
4. Segment, 2310 instances, 19 variables, 7 classes.
5. Satimage, 6435 instances, 36 variables, 6 classes.

The tab. 1 below shows the number of instances for each class in these problems.

To receive adequate results, we used stratified sample splitting into 10 folds to perform 10-fold cross validation. The cross validation procedure was performed three times and the results were averaged over all 30 runs of the algorithm. The algorithm resources were the following: 100 individuals, 500 generations, 40 rules maximum.

The next tab. 2 shows the results for the first problem, the *Acc* and *Ave* values for four parameter combinations.

When using the *Acc* value as the classification quality, the accuracies on both learning and test samples are the best, while the *Ave* values are very low. Applying the *Ave* measure significantly improves *Ave* values, but the accuracy decreases. Adding unbiased class numbering not only increases *Ave* values, but also improves the accuracy (tab. 3).

For the German dataset the results are almost the same, but the learning and test accuracy does not change very much. Again, unbiased class numbering gives the best test *Ave* values (tab. 4).

This problem is rather interesting because here the *Ave* values appeared to be higher than the accuracy for configurations #2 and #4, and this is true for both the learning and testing samples. This can be due to the fact that the minority class was easier to describe for the learning algorithm than the majority class, so that the accuracy on it was much higher. The unbiased class numbering does not give any advantages for this problem (tab. 5).

Although this problem has 7 classes, all of them are balanced. The results show that in this case there is no difference in classification results for all modifications as the quality criteria are not sensitive to biased classification in this case (tab. 6).

The last problem appears to be not very sensitive to different quality criteria, but a slight improvement in the *Ave* measure can be tracked when using it in the fitness function. An important thing about this problem is that in most of the cases, the algorithm was not able to build any significantly good rule for the third class, so that it was always misclassified into the second class.

To show the real classification results here we also provide averaged confusion matrixes for the first, second and fourth configurations for the test sample to show the difference. First, two confusion matrixes are provided for the page-blocks problem (tab. 7–9).

Table 1

Class instances for all problems

Problem/Class	1	2	3	4	5	6	7
Page-blocks	4913	329	28	87	115	–	–
German	700	300	–	–	–	–	–
Phoneme	3818	1586	–	–	–	–	–
Segment	330	330	330	330	330	330	330
Satimage	1533	703	1358	626	707	1508	–

Table 2

Results for Page-blocks problem

Configuration	Learning *Acc*	Learning *Ave*	Test *Acc*	Test *Ave*
Acc+biased	**0.959**	0.600	**0.955**	0.584
Ave+biased	0.879	0.810	0.874	0.767
Acc+unbiased	0.951	0.602	0.947	0.573
Ave+unbiased	0.891	**0.855**	0.887	**0.822**

Table 3

Results for German problem

Configuration	Learning *Acc*	Learning *Ave*	Test *Acc*	Test *Ave*
Acc+biased	0.797	0.681	**0.726**	0.591
Ave+biased	0.794	0.759	0.715	0.633
Acc+unbiased	**0.802**	0.694	0.721	0.596
Ave+unbiased	**0.802**	**0.777**	0.719	**0.678**

Table 4

Results for Phoneme problem

Configuration	Learning *Acc*	Learning *Ave*	Test *Acc*	Test *Ave*
Acc+biased	**0.825**	0.781	**0.815**	0.768
Ave+biased	0.803	0.824	0.792	0.811
Acc+unbiased	0.821	0.778	0.810	0.764
Ave+unbiased	0.803	**0.826**	0.791	**0.812**

Table 5

Results for Segment problem

Configuration	Learning *Acc*	Learning *Ave*	Test *Acc*	Test *Ave*
Acc+biased	0.912	0.900	0.912	0.900
Ave+biased	0.909	0.896	0.909	0.896
Acc+unbiased	0.909	0.895	0.909	0.895
Ave+unbiased	0.911	0.903	0.911	0.903

Table 6

Results for Satimage problem

Configuration	Learning *Acc*	Learning *Ave*	Test *Acc*	Test *Ave*
Acc+biased	0.837	0.756	0.829	0.748
Ave+biased	0.838	**0.767**	0.830	**0.757**
Acc+unbiased	0.836	0.755	0.826	0.745
Ave+unbiased	0.837	**0.763**	0.828	**0.755**

Table 7

Confusion matrix for Page-blocks, *Acc*+biased

	Predicted 1	Predicted 2	Predicted 3	Predicted 4	Predicted 5	Unknown
True 1	**487,26**	2,80	0,06	0,53	0,60	0,03
True 2	4,33	**28,03**	0,00	0,16	0,33	0,03
True 3	**1,83**	0,00	0,93	0,00	0,00	0,03
True 4	3,00	0,13	0,00	**5,36**	0,13	0,06
True 5	**9,83**	0,00	0,13	0,00	1,50	0,03

Table 8

Confusion matrix for Page-blocks, *Ave*+biased

	Predicted 1	Predicted 2	Predicted 3	Predicted 4	Predicted 5	Unknown
True 1	**432,06**	22,16	5,96	10,93	20,06	0,10
True 2	1,36	**29,66**	0,30	0,43	1,13	0,00
True 3	0,90	0,00	**1,53**	0,03	0,33	0,00
True 4	0,53	0,53	0,13	**6,83**	0,63	0,03
True 5	1,86	0,80	0,23	0,26	**8,30**	0,03

Table 9

Confusion matrix for Page-blocks, *Ave*+unbiased

	Predicted 1	Predicted 2	Predicted 3	Predicted 4	Predicted 5	Unknown
True 1	**437,83**	21,56	2,73	12,23	16,86	0,06
True 2	1,43	**29,80**	0,03	0,50	1,06	0,06
True 3	0,53	0,00	**2,00**	0,00	0,23	0,03
True 4	0,30	0,13	0,16	**7,43**	0,63	0,03
True 5	1,73	0,63	0,23	0,26	**8,63**	0,00

From these tables one may see that using the *Ave* measure together with unbiased class numbering allows the classifying of most of the class instances correctly, although the accuracy on the majority class, as well as the overall accuracy becomes lower. From the comparison of tab. 8 and 9, it can be seen that although the unbiased procedure does not change significantly the accuracy on the majority class, for classes 3 and 4 there is a significant change in the average number of correctly classified instances.

Conclusion. In this paper an improvement for the hybrid evolutionary genetics-based classifier forming algorithm was proposed, which allowed a significant improvement in testing *Ave* values for most of the tested unbalanced datasets. This improvement balances the class numbering procedure by adding information about the number of class instances so that every class has the same chance to be in the right side of the rule, only depending on the membership values. Together with the *Ave* measure in the fitness function, the unbalanced class numbering provides the most balanced results on both test and learning samples. Moreover, this improvement does not influence balanced datasets and does not change the accuracy on them. Further improvements for the more adequate classification of unbalanced datasets for this algorithm may include the using of more complex quality measures and the developing of an unbiased rule weighting procedure.

Acknowledgment. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project 140/14.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, НИР 140/14.

References

1. Bhowan U. Genetic Programming for Classification with Unbalanced Data. Victoria University of Wellington. 2012, 270 pp.

2. Fernández A., García S., Jesus M., Herrera F. A study of the behaviour of linguistic fuzzy rule based classification systems in the framework of imbalanced datasets. *Fuzzy Sets and Systems*. 2008, vol. 159, p. 2378–2398.

3. Ishibuchi H., Yamamoto T. Rule weight specification in fuzzy rule-based classification systems. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. 2005, vol. 13, no. 4, p. 428–435.

4. Ishibuchi H., Yamamoto T. Fuzzy rule selection by multi-objective genetic local search algorithms and rule evaluation measures in data mining. *Fuzzy Sets and Systems*. 2004, vol. 141, p. 59–88.

5. Wang L., Mendel J. Generating fuzzy rules by learning from examples. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*. 1992, vol. 22, no. 6, p. 1414–1427.

6. Semenkina M. E. [Self-adaptive evolutionary algorithms for design of intelligent data analysis information technologies]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy*. 2013, no. 1, p. 13–23 (In Russ.).

7. Alcala R., Alcala-Fdez J., Herrera F., Otero J. Genetic learning of accurate and compact fuzzy rule based systems based on the 2-tuples linguistic representation. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2007, no. 44, p. 45–64.

8. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2012, 7331 LNCS (PART 1), p. 414–421.

9. Ishibuchi H., Mihara S., Nojima Y. Parallel Distributed Hybrid Fuzzy GBML Models With Rule Set Migration and Training Data Rotation. *IEEE Transactions on fuzzy systems*. 2013, vol. 21, no. 2, p. 355–368.

10. Akhmedova S. A., Semenkin E. S. Co-Operation of Biology Related Algorithms Meta-Heuristic in ANN-Based Classifiers Design. *Proceedings of the World Congress on Computational Intelligence (WCCI'14)*. 2014, p. 867–872.

11. Khritonenko D. I., Semenkin E. S. Distributed Self-Configuring Evolutionary Algorithms For Artificial Neural Networks Design. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 4 (50), p. 112–116 (In Russ.).

12. Akhmedova S. A., Semenkin E. S., Gasanova T., Minker. W. Co-Operation of Biology Related Algorithms for Support Vector Machine Automated Design. *Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i'14)*. 2014, p. 1831–1837.

13. Brester C., Semenkin E. Development of adaptive genetic algorithms for neural network models multicriteria design. *Vestnik SibGAU.* 2013, no. 4 (50), p. 99–103 (In Russ.).

14. Asuncion A., Newman D. UCI machine learning repository. University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences, 2007, Available at: http://www.ics.uci.edu/~mlearn/MLRepository.html.

15. Ishibuchi H., Nojima Y. Analysis of interpretability-accuracy tradeoff of fuzzy systems by multiobjective fuzzy genetics-based machine learning. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2007, no. 44, p. 4–31.

Библиографические ссылки

1. Bhowan U. Genetic Programming for Classification with Unbalanced Data. Victoria University of Wellington, 2012, 270 pp.

2. A study of the behaviour of linguistic fuzzy rule based classification systems in the framework of imbalanced data-sets / A. Fernández [et al.] // Fuzzy Sets and Systems. 2008. № 159. P. 2378–2398.

3. Ishibuchi H., Yamamoto T. Rule weight specification in fuzzy rule-based classification systems // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2005. Vol. 13, no. 4. P. 428–435.

4. Ishibuchi H., Yamamoto T. Fuzzy rule selection by multi-objective genetic local search algorithms and rule evaluation measures in data mining // Fuzzy Sets and Systems. 2004. № 141. P. 59–88.

5. Wang L., Mendel J. Generating fuzzy rules by learning from examples // IEEE Transactions on systems, man and cybernetics. 1992. Vol. 22, No. 6. Pp. 1414–1427.

6. Семенкина М. Е. Самоадаптивные эволюционные алгоритмы проектирования информационных технологий интеллектуального анализа данных // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 1. С. 13–23.

7. Genetic learning of accurate and compact fuzzy rule based systems based on the 2-tuples linguistic representation / R. Alcala [et al.] // International Journal of Approximate Reasoning. 2007. № 44. Pp. 45–64.

8. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2012. 7331 LNCS (PART 1). P. 414–421.

9. Ishibuchi H., Mihara S., Nojima Y. Parallel Distributed Hybrid Fuzzy GBML Models With Rule Set Migration and Training Data Rotation // IEEE Transactions on fuzzy systems. 2013. Vol. 21, No. 2. P. 355–368.

10. Akhmedova S. A., Semenkin E. S. Co-Operation of Biology Related Algorithms Meta-Heuristic in ANN-Based Classifiers Design // Proceedings of the World Congress on Computational Intelligence (WCCI'14). 2014, p. 867–872.

11. Khritonenko D. I., Semenkin E. S. Distributed Self-Configuring Evolutionary Algorithms For Artificial Neural Networks Design // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 112–116.

12. Co-Operation of Biology Related Algorithms for Support Vector Machine Automated Design / S. A. Akhmedova [et al.] // Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i'14). 2014, p. 1831–1837.

13. Brester C., Semenkin E. Development of adaptive genetic algorithms for neural network models multicriteria design // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 99–103.

14. Asuncion A., Newman D. UCI machine learning repository. University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences, 2007. URL: http://www.ics.uci.edu/~mlearn/MLRepository.html.

15. Ishibuchi H., Nojima Y. Analysis of interpretability-accuracy tradeoff of fuzzy systems by multiobjective fuzzy genetics-based machine learning // International Journal of Approximate Reasoning. 2007. № 44. Pp. 4–31.

© Stanovov V. V., Semenkina O. E., 2015

UDC 519.87

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 137–142

SOLVING THE PROBLEM OF CITY ECOLOGY FORECASTING WITH NEURO-EVOLUTIONARY ALGORITHMS

D. I. Khritonenko*, E. S. Semenkin, E. V. Sugak, E. N. Potilitsina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
*E-mail: hdmitry.91@mail.ru

In this paper the problem of a city ecological condition forecasting based on the chemical composition of the air is considered. The procedure of solving this problem with artificial neural networks, grown by evolutionary algorithms is described. Several modifications of evolutionary algorithms and ensemble approach for neural predictor design allowing the increase of prediction efficiency are presented. Also an ensemble method for neural predictor design is considered to increase the efficiency. The existing methods for design of intelligence information technologies ensembles have been considered. The comparison of their efficiency is presented in the paper for a set of test problems. A modified approach for artificial neural network ensembles is proposed, which is different from known before with combined application of existing schemes and methods for ensemble organization. In the problem description the problem of large amount of missing values in the dataset is highlighted. To solve this problem, a modified genetic programming method is applied. The usefulness of this method is shown for the problem solving. The testing shows the efficiency of the presented approach compared to basic and ensemble models. One of the applications of the developed algorithm is the time series prediction. Many technical systems contain a large amount of dynamic parameters, and tracking and predicting these parameters is an important problem. The rocket and space technology is no exception, so the described algorithm is a useful data analysis instrument for it. The developed approach can be used as a method for individual predictors' creation, and also as way for combining the existing ones. It is shown that this approach allows increasing the accuracy of the resulting models.

Keywords: artificial neural networks, ensembles, evolutionary algorithms, time series prediction, city ecology analysis.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 137–142

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРОДА НЕЙРОЭВОЛЮЦИОННЫМИ АЛГОРИТМАМИ

Д. И. Хритоненко*, Е. С. Семенкин, Е. В. Сугак, Е. Н. Потылицына

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: hdmitry.91@mail.ru

Рассматривается решение задачи прогнозирования экологического состояния города в зависимости от химического состава воздуха. Описывается процедура решения данной задачи при помощи искусственных нейронных сетей, выращенных эволюционными алгоритмами. Представлены некоторые из модификаций эволюционных алгоритмов, которые позволяют повысить эффективность предсказания. Также с целью повышения эффективности рассматривается коллективный подход к построению нейросетевых предикторов. Были описаны существующие сегодня методы формирования коллективов интеллектуальных информационных технологий. Представлено сравнение их эффективности на ряде тестовых задач. Предлагается модифицированный подход к проектированию коллективов искусственных нейронных сетей, отличающийся от известных комбинированным использованием существующих схем и методов организации коллектива. В описании решаемой задачи подчеркивается проблема наличия большого количества пропусков в таблице данных. Для ее решения используется модифицированный метод генетического программирования. Показана полезность использования данной процедуры при решении поставленной задачи. Тестирование показывает эффективность предложенного подхода по сравнению с базовой и коллективной моделями. Одно из приложений разработанного алгоритма – предсказание временных рядов. Многие технические системы содержат большое количество динамических параметров, отслеживание и предсказание которых является важной задачей. Ракетно-космическая техника не является исключением, а потому описанный алгоритм является для нее полезным инструментом анализа данных. Разработанный подход может являться как средством создания самостоятельных

предикторов, так и средством комбинирования уже существующих. Показано, что такой подход позволяет увеличить точность итоговых моделей.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, коллективы, эволюционные алгоритмы, прогнозирование временных рядов, анализ экологической ситуации в городе.

Introduction. The modern ecological condition of cities leads to the necessity of finding the risk factors and developing a control system for solving the technogenic problems. However, today the methods for estimating the risk level for urban territories, including geo-ecological risks, are still not developed properly. The lack of generalizing representations and concepts and general methodological principles is one of the main disadvantages in the field of ecological risk estimations.

As most industrial and urban territories are located in basins, there may be increased local circulation and aggregation of impurities in lower parts of the relief [1]. Adverse orographic and meteorological features in connection with atmosphere air quality lead to a higher air pollution level in the following cases: industrial sites are close to residential areas; the number of cars is increasing; continuous house building and destruction of green areas. The high prevalence of diseases related to ecology among the populations of large industrial centres, and a trend of an increasing pathology level determine the special importance of studying the health of city populations.

Concerning this, there appears a real necessity of adding programmes for analysing information about the environment condition to the ecological monitoring complex. This necessity is due to the multi-dimensionality and multi-coupling of ecological data. Many ecological processes are characterized by non-linearity and uncertainty which makes estimation and forecasting the ecological situation more complex. To increase the efficiency and accuracy of the decision-making process, artificial intelligence technologies capable of working in the conditions of non-certain input information are used nowadays. One of the perspective directions of using artificial intelligence technologies in ecological monitoring is in the use of artificial neural networks in problems of predicting and forecasting ecological situations [2].

Automatic generation of artificial neural networks and their ensembles. An artificial neural network (ANN) is a combination of mathematical models of neurons of the human brain, which allow the most complex data analysis problems to be efficiently solved [3]. However, when using this approach the researcher always faces a problem of choosing the optimal structure of the neural network and the optimal learning procedure according to the specified efficiency criterion. Of course, the "trial and error" method is not a successful choice in this case, as it takes a huge amount of computational resources. The deep knowledge and experience of the expert in the field of neural networks is needed, nevertheless, the "trial and error approach" might result in insufficient modelling accuracy. Today for solving the given problem, methods imitating the evolutionary process of the real world – evolutionary algorithms – are used. They allow the researcher to design the artificial neural networks automatically and with high efficiency [4]. Also, today there is a set of modifications of evolutionary algorithms that allow their efficiency to be increased. Also, these algorithms do not require any parameter tuning, so they are easy to use for many researchers, even if they do not have specific knowledge in the field of evolutionary modelling [4; 5].

The standard scheme for solving data analysis problems [6] with intelligence information technologies (IIT), in particular, neural networks, involves two stages. In the first stage, the structure and parameters of the neural networks are adjusted, and in the second the best of the neural networks is used for solving the problem. However, using several neural networks at the same time by combining them into an ensemble can be useful [7; 8]. Increasing the quality of the received solutions with such an approach was observed long ago. The combining of neural networks into ensembles was first reported in the works of Hansen and Salamon [9]. The efficiency of such approaches was also shown in these works.

Today using ensembles is one of the promising directions in automated learning methods [10]. To design an ensemble, three tasks should be performed:

1) Choose the method of designing individual ANNs;
2) Selection of ANNs for forming ensembles from the overall set of solutions obtained;
3) Determining the method for consideration of the "views" for every part of such ensemble.

In 1988 the problem of weak learning capabilities was studied. The problem was solved by strengthening the weak algorithms with boosting [11]. The essence is that if this algorithm is in a specific method for forming the learning sample for every next neural network, the learning sample includes incorrectly solved examples from the previous one. So, the examples are processed by consecutive set of ANNs. In 1993 the efficient learning algorithm, based on this principle, was developed [12; 13]. In 1996 Breiman [14] proposed a bagging method, which learns every IIT with a sample, randomly (with returns) formed from the original one. This method is considered to be the most effective for samples of small size, as the lack of the part of learning examples in these samples leads to significant diversity in the received IIT. With a large number of features and a small number of learning examples the method of random subspaces should be used [15]. In such method separate IIT are learned on different sets of attributes, which were selected randomly. The listed methods allow the generation of different IITs (in particular, ANNs) for forming ensembles.

The question of how to consider separate views of different ensemble members is still to be considered. The basic work in this field describes the voting method [9], and also the averaging method. There is a modification of this method that allows errors of every ensemble member to be taken into account. We will now describe these two methods:

1. The outputs of the ensemble members are summed and divided by their number.

2. The error of each of the ensemble member is taken into account. Each of them is associated with a weight, inversely proportional to the error [16]. The output values are summed and divided by their number.

There is a scheme, allowing an error to be obtained which is not higher than the best of the ensemble members [7]:

1. The point in the learning sample is found which is the closest to the point where we need to get the value.
2. The IIT which has the lowest error is determined in this point.
3. The selected IIT makes the decision about the value in the point of interest.

The forming of the ANN ensemble is also possible by means of the self-configured genetic programming algorithm [4]. For this purpose, the functional set is filled with different mathematical operators and functions (sine, cosine, addition, subtraction, and so on), and the terminal set is filled with different adjustable coefficients and outputs of the neural networks which were selected into the ensemble. Using such an instrument does not require additional costs for its adjustment and allows ensemble forming in automatic mode.

Thus, applying evolutionary algorithms may allow the design of efficient ensembles of artificial neural networks in automated mode without using special knowledge of neuro-evolutionary modelling. The efficiency of the programme realization of the presented algorithms for ecological condition forecasting using the chemical air composition will be presented in the next section of the paper.

The problem description. There is a sample (x_i,y_i), $i = 1,2, \ldots, n$, where n – is the number of instances in the sample; x_i – is the vector of size m, where m – is the number of sample attributes, y_i – is the observed value. It is also known that y_i may not only depend on its previous k values, but also on values of x_i. The dependence between x_i, x_{i-1}, …, x_{i-k}, y_i, y_{i-1}, …, x_{i-k} and y_{i+1} should be defined, that means to predict the values of y_{i+1} or solve the time series problem [17].

The sample is a matrix with 39 columns, 28 of which are problem attributes, and 10 are the values to be predicted, and 32 rows – the number of instances. One of the columns is the year when the attributes were measured. There are also missing values in the database. The attributes show the constituents of different harmful materials in the air: copper, zinc, iron, chlorine, and so on. All other measures show different diseases and their mortality.

The data available in the sample was obtained in the environment pollution monitoring centre of GU "Krasnoyarsk CGSM-R" which observes the atmosphere air quality at 8 stationary posts in the city of Krasnoyarsk. The yearbooks of the "condition of the air pollution of the cities on the territory of Krasnoyarsk region, republics of Khakassia and Tuva" from year 1999 to 2012 were processed [18]. Sanitary-demographic statistics was obtained in the territorial authority of the Federal Service of State Statistics in Krasnoyarsk region ("Krasnoyarskstat") [19].

For the convenience of further understanding the data, the predicted values are numbered with values from *Out1* to *Out10* and some numerical data about these values is presented. In tab. 1 the original names of the predicted values are presented, as well as the corresponding numbering, the minimum and maximum values in the column and also the average value and the standard deviation.

Problem solving and results. The database for the problem has missing values, as already has been mentioned. Given the small size of the sample, and also the fact that the missing values are present in a significant part of the sample, the recovery of missing values is necessary. One of the promising approaches for the described conditions is the use of evolutionary algorithms [20], and in particular, the genetic programming algorithm for building non-linear regression. For this problem the terminal and the functional set of the genetic programming algorithm is filled with different mathematical operators and functions, and also some numerical values and feature variables of the problem. Here we provide the comparison of the prediction results by a perceptron, which was grown with a genetic programming algorithm [4] for the cases with and without the recovery of missing values. In the case without the use of the recovery procedure, the incomplete data was excluded, as well as the problem attributes.

Table 1

Numerical characteristics of problems

Predicted value	Birthrate (per 1000 of population)	Mortality (per 1000 of population)	Mortality for children under 1 (per 1000 of population)	Patients with malignancies (per 100.000 of population)	Mortality from malignancies (per 100.000 of population)
Numbering	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5
Min.	8.3	8.9	4.8	1042	180.26
Max.	14.3	15.5	21.0	2483.8	211.9
Average	10.98	12.41	14.26	1822.65	202.44
Std. dev.	1.89	1.80	5.91	429.42	8.75
Predicted value	Mortality – circulatory system (per 100.000 of population)	Mortality – respiratory (per 100.000 of population)	Mentally ill (per 100.000 of population)	Mortality for mentally ill (per 100.000 of population)	Mortality – nervous system (per 100.000 of population)
Numbering	Out6	Out7	Out8	Out9	Out10
Min.	441.44	38.69	686.7	0.91	5.31
Max.	726.05	72.16	1407.4	11.42	8.98
Average	594.03	55.93	931.07	5.83	6.79
Std. dev.	76.16	8.70	198.96	3.91	1.13

A series of runs using the cross-validation procedure was performed for comparison for every value to be predicted. The average values of the following criterion over all runs are presented in the tab. 2:

$$I = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{y_i - y_i^*}{y_i^*} \right| \cdot 100\ \%,$$

where y_i – is the obtained value in the i-th point; y_i^* – is the true value; n – is the sample size, $y_i^* \neq 0 \forall i$. As we can see from the results presented in tab. 2, the missing values recovery procedure allows information about predicted values to be saved as well as the increased efficiency of the obtained predictors.

Now we will describe the proposed method for solving the problem and present the tested variants of the algorithm. The basic model is the procedure of generating automated artificial neural networks with arbitrary structure and different activation functions by means of genetic programming and a genetic algorithm. The tab. 3 below contains the average value of the required criterion over all runs for the best generated neural networks.

We will now describe the ensembles. For the dependence recovery procedure, the previously described methods for ensemble forming were tested (schemes 1–3). The comparison has shown that the modified genetic programming algorithm [4; 5; 8] handles this problem an order of magnitude better. This is why this method was chosen to build the neural predictors further (tab. 4).

It should be mentioned that it is difficult to track the collective diversity in such an approach. In part, this problem is solved by the ensemble forming algorithm itself. Also, the diversity is achieved by the combined use of GP and GA for the growing of neural networks. The stochastic nature of the evolutionary algorithms also helps to solve the problem of diversity.

To solve this problem, a more complex method of the ensemble organization is proposed. In tab. 3 it is called the “proposed method”. As mentioned earlier, for maintaining the diversity in the case of small samples, the bagging method is promising [14]. For the predictor strengthening, the boosting approach can be used [11]. In this case, the ensemble organization scheme described in [7] is used. The final ensemble is formed with a genetic programming algorithm. The functional set in this case is a set of mathematical operators and functions. The terminal set contains coefficients and generated neural networks (or ensembles, made by boosting or bagging). Applying the boosting approach gives a minor, but statistically significant increase in efficiency (less than 1 %).

As we can see from tab. 3, the proposed method is 5 % better than the classical method for the ensemble design with GP on average. This method is, in turn, 13 % better than the basic model. The improvement is achieved because of the combined use of the bagging and boosting approaches. An important fact is that this approach adds only one additional parameter to the algorithm, which means that the optimization system programme does not become more complicated for the user.

Further improvement of the approach includes adding dynamics into the model by using recurrent neural networks. The flexibility of evolutionary algorithms allows such a kind of neural networks to be generated. Increasing the sample size will allow improvement of the existing predictors and the creation of new predictors for this problem.

Table 2

Missing values recovery algorithm efficiency

	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	Out6	Out7	Out8	Out9	Out10
With missing values	9.8	12.7	6.1	4.2	6.3	1.5	0.5	5.3	4.7	10.5
Without missing values	9.2	12.5	5.4	2.4	5.4	1.0	0.2	4.8	3.8	8.5

Table 3

Efficiency comparison

	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	Out6	Out7	Out8	Out9	Out10
Basic model	9.2	12.5	5.4	2.4	5.4	1.0	0.2	4.8	3.8	8.5
Ensembles	5.9	10.1	5.4	2.2	4.0	1.0	0.2	3.1	3.6	8.0
Proposed method	5.1	9.3	5.4	1.9	3.9	1.0	0.2	2.8	3.6	7.6

Table 4

Comparison of ensemble forming methods

	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3	GP
Mean square error	0.002	0.0015	0.004	0.0001

Conclusion. The real-world problem of the predicting the ecological condition of the city was solved with algorithms of neuro-evolutionary modeling. The standard methods of solving the problem were considered, as well as a modified method of ensembling artificial neural networks. The efficiency of the existing ensemble methods was tested. As a result of testing, for the most of the predicted values the proposed modification has shown better performance than the basic algorithm. For a set of predicted values, the efficiency of the approach did not change. This may be because of the small volume of the sample, and also because of the absence of key variables of the problem. The further expansion of the sample will allow solving this problem. Recovering the missed values with the genetic programming algorithm also allowed increasing the efficiency of the approach. Generating recurrent neural networks and their ensembles is one of possible ways for the further development of the approach. However, one should remember that using a universal procedure for evolutionary design of neural network predictors significantly increases the computational complexity that can be unacceptable in some cases.

Acknowledgment. The work is fulfilled with the support of the Russian Foundation of Fundamental Researches (project 14-06-00256).

Благодарности. Работа выполняется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-06-00256).

References

1. Taseiko O. V., Mikhailuta S. V., Zakharov U. V. [Modelling of local conditions of pollution dissipation among city buildings]. *LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrucken*, 2011, 122 p. (In Russ.).

2. Potilitsina E. N., Lipinskiy L. V., Sugak E.V. [Using artificial neural networks for solving applied ecological problems]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 4, p. 51 (In Russ.).

3. Kriesel D. A. Brief Introduction to Neural Networks. Available at: http://www.dkriesel.com/_media/science/neuronalenetze-en-zeta2-2col-dkrieselcom.pdf (accessed 01.9.2014).

4. Khritonenko D.I., Semenkin E. S. Distributed self-configuring evolutionary algorithms for artificial neural networks design. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 4 (50), p. 112–116.

5. Semenkin E. S., Semenkina M. E. [Application of genetic algorithm with modified uniform recombination operator for automated forming of intelligent information technologies]. *Vestnik SibGAU*. 2007, no. 3, p. 27–33 (In Russ.).

6. Lippmann, R. P. An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Mag*., Apr. 1987, p. 4–22.

7. Popov E. A., Semenkina M. E., Lipinskiy L. V., [Decision making by an ensemble of intelligent information technologies], *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 5 (45), p. 95–99 (In Russ.).

8. Semenkin E. S., Shabalov A. A., Efimov S. N., [Automated design of intelligent information technologies ensembles with genetic programming]. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 3, p. 77–81 (In Russ.)

9. Hansen L.K., Salamon P. Neural network ensembles. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 1990, no. 12 (10), p. 993–1001.

10. Zhou Z.-H., Jiang Y. NeC4.5: Neural Ensemble Based C4.5. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 16(6): 770–773, – 2004.

11. Schapire R. E. The strength of weak learnability. *Machine Learning.* 1990. Vol. 5. pp. 197–227.

12. Schapire R. The boosting approach to machine learning: An overview. *MSRI Workshop on Nonlinear Estimation and Classification, Berkeley, CA*. 2001.

13. Freund Y., Schapire R. E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *European Conference on Computational Learning Theory.* 1995. pp. 23–37.

14. Breiman L. Bagging predictors. *Machine Learning*. 1996, vol. 24 (2), p. 123–140.

15. Skurichina M., Duin R. P. W. Limited bagging, boosting and the random subspace method for linear classifiers. *Pattern Analysis & Applications*. 2002, no. 5, p. 121–135.

16. Perrone M. P., Cooper L. N. When networks disagree: ensemble method for neural networks. *Artificial Neural Networks for Speech and Vision, Chapman & Hall, New York,* 1993, p. 126–142.

17. Semenkin E. S., Shabalov A. A. Intelligent information technologies in time series forecasting. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 4 (50), p. 128–134.

18. *Sostoyanie zagryazneniya atmosfernogo vozdukha gorodov na territorii Krasnoyarskogo kraya, respublik Khakasiya i Tyva v 2010 g.* [The condition of air pollution of the cities on the territory of Krasnoyarsk region, republics of Khakassia, Tuva in 2010]. Krasnoyarsk, 2011, 116 p.

19. *Zdravookhranenie v g. Krasnoyarske v 2012 godu. Territorial'nyy organ federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po Krasnoyarskomu krayu* [Health service in Krasnoyarsk in the year 2012. Territorial authority of federal service of state statistics in Krasnoyarsk region]. Statistic Bulletin no. 8-5.2. Krasnoyarsk, 2013, 15 p.

20. Snituk V. E. [Evolutionary method for missing data recovering]. *Sbornik trudov VI-y Mezhd. konf. "Intellektual'nyy analiz informatsii"* [Proceedings of the VI-th International conference "Intelligent data analysis"]. Kiev, 2006, p. 262–271 (in Russ.).

Библиографические ссылки

1. Тасейко О. В., Михайлюта С. В., Захаров Ю. В. Моделирование локальных условий рассеивания загрязнителей в городской застройке // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Saarbrucken, 2011. 122 с.

2. Потылицына Е. Н., Липинский Л. В., Сугак Е. В. Использование искусственных нейронных сетей для решения прикладных экологических задач // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 51.

3. Kriesel D. A. Brief Introduction to Neural Networks [Электронный ресурс]. URL: http://www. dkriesel.com/_media/science/neuronalenetze-en-zeta2-2col-dkrieselcom.pdf (дата обращения: 01.9.2014).

4. Khritonenko D. I., Semenkin E. S. Distributed self-configuring evolutionary algorithms for artificial neural networks design // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 112–116.

5. Семенкин Е. С., Семенкина М. Е. Применение генетического алгоритма с модифицированным оператором равномерной рекомбинации при автоматизированном формировании интеллектуальных информационных технологий // Вестник СибГАУ. 2007. № 3. С. 27–33.

6. Lippmann R. P. An introduction to computing with neural nets // IEEE ASSP Mag. Apr. 1987. Pp. 4–22.

7. Попов Е. А., Семенкина М. Е., Липинский Л. В. Принятие решений коллективом интеллектуальных информационных технологий // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 95–99.

8. Семенкин Е. С., Шабалов А. А., Ефимов С. Н. Автоматизированное проектирование коллективов интеллектуальных информационных технологий методом генетического программирования // Вестник СибГАУ. 2011. № 3. С. 77–81.

9. Hansen L. K., Salamon P. Neural network ensembles // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. № 12 (10). Pp. 993–1001.

10. Zhou Z.-H., Jiang Y. NeC4.5: Neural Ensemble Based C4.5 // IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 2004. № 16(6). P. 770–773.

11. Schapire R. E. The strength of weak learnability // Machine Learning. 1990. Vol. 5. Pp. 197–227.

12. Schapire R. The boosting approach to machine learning: An overview // MSRI Workshop on Nonlinear Estimation and Classification. Berkeley, CA, 2001.

13. Freund Y., Schapire R. E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting // European Conference on Computational Learning Theory. 1995. Pp. 23–37.

14. Breiman L. Bagging predictors // Machine Learning. 1996. Vol. 24 (2). Pp. 123–140.

15. Skurichina M., Duin R. P. W. Limited bagging, boosting and the random subspace method for linear classifiers // Pattern Analysis & Applications. 2002. № 5. Pp. 121–135.

16. Perrone M. P., Cooper L. N. When networks disagree: ensemble method for neural networks // Artificial Neural Networks for Speech and Vision, Chapman & Hall. New York, 1993. Pp. 126–142.

17. Semenkin E. S., Shabalov A. A. Intelligent information technologies in time series forecasting // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 128–134.

18. Состояние загрязнения атмосферного воздуха городов на территории Красноярского края, Республик Хакасия и Тыва в 2010 г. : ежегодник. Красноярск, 2011. 116 с.

19. Здравоохранение в г. Красноярске в 2012 году : стат. бюллетень № 8-5.2 / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Красноярскому краю. Красноярск. 2013. 15 с.

20. Снитюк В. Е. Эволюционный метод восстановления пропусков в данных // Интеллектуальный анализ информации : сб. тр. VI Междунар. конф. Киев, 2006. С. 262–271.

© Khritonenko D. I., Semenkin E. S., Sugak E. V., Potilitsina E. N., 2015

УДК 519.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 143–152

ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПО ВЫБОРКАМ ТЕКУЩИХ СОСТОЯНИЙ

Е. В. Чимитова

Новосибирский государственный технический университет
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, ул. Карла Маркса, 20
E-mail: chimitova@corp.nstu.ru

Рассматриваются вопросы построения вероятностной модели отказов по результатам испытаний на надежность устройств одноразового срабатывания. Прежде всего, речь идет об устройствах, от безотказной работы которых непосредственно зависит готовность космических аппаратов выполнять свои функции. В частности, это устройства для крепления и расфиксации подвижных элементов конструкции космического аппарата: солнечных панелей, радиолокационных антенн, раскрываемых штанг приборов и прочего оборудования. В случае успешного срабатывания устройства мы имеем цензурированное справа наблюдение; если же устройство не сработало, значит отказ произошел до момента времени тестирования и мы получаем цензурированное слева наблюдение. Полученную в результате выборку цензурированных слева и цензурированных справа наблюдений (без полных наблюдений) называют выборкой текущих состояний.

Для ряда распределений, наиболее часто используемых в задачах теории надежности, проведено исследование отношения информационного количества Фишера о параметрах в выборке текущих состояний к информации Фишера в полной выборке. В результате максимизации информационного количества Фишера получены оптимальные моменты времени тестирования изделий одноразового срабатывания (с позиции точности оценок максимального правдоподобия).

Предложен алгоритм вычисления непараметрической оценки функции распределения по выборкам текущих состояний, обеспечивающий максимум функции правдоподобия по значениям функции распределения в точках, соответствующих моментам времени тестирования устройств. С использованием метода Монте-Карло проведено исследование статистических свойств непараметрической оценки в зависимости от объема выборки и числа моментов тестирования.

Для проверки адекватности построенной вероятностной модели по выборкам текущих состояний автором предложены статистические критерии согласия типа Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, хи-квадрат и Уайта, применение которых предполагает нахождение неизвестных условных распределений статистик $G(S|H_0)$ применяемых критериев с использованием метода Монте-Карло. Проведен сравнительный анализ критериев по мощности, в результате которого в качестве наиболее предпочтительного рекомендуется критерий согласия типа хи-квадрат.

Ключевые слова: надежность устройств одноразового срабатывания, выборки текущих состояний, метод максимального правдоподобия, непараметрическая оценка функции распределения, критерии согласия, модель ускоренных испытаний, метод Монте-Карло.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 143–152

THE CONSTRUCTION OF PROBABILISTIC RELIABILITY MODELS ON THE BASIS OF CURRENT STATUS DATA

E. V. Chimitova

Novosibirsk State Technical University
20, Karla Marksa Str., Novosibirsk, 630073, Russian Federation
E-mail: chimitova@corp.nstu.ru

In this paper, I consider the problems, which arise in construction of probabilistic lifetime models on the basis of data, obtained from the reliability experiment on one-shot devices. First of all, we are interested in reliability of those one-shot devices, which provide the ability of a spacecraft to perform its functions. In particular, the examples are the devices for fixing and unfixing mobile elements of a spacecraft: solar panels, radar antennas, disclosing bar devices and other equipment. One-shot devices are tested at some predetermined inspection times, and the experiment results in reporting the status of devices instead of an actual failure time. The failure time here is either left censored, if the test

outcome is a failure, or right censored, if the test outcome is a success. The obtained sample of left censored and right censored observations (without complete observations), is called a current status sample.

For a number of distributions, which are frequently used in reliability theory, I have investigated the ratio of the Fisher information about distribution parameters in a current status sample to the Fisher information in a complete sample of observations. As a result of maximization of the Fisher information, I have obtained the optimal inspection times (from the position of minimal variance of maximum likelihood estimates).

I have proposed an algorithm for calculation of nonparametric estimator of lifetime distribution function by current status samples, which provides the maximum of the likelihood function by the values of distribution function at the points of inspection times. I have investigated the statistical properties of obtained nonparametric estimator depending on the sample size and the number of inspection times with Monte Carlo method.

For testing adequacy of constructed probabilistic model by current status samples, the author has proposed the goodness-of-fit tests of Kolmogorov, Cramer-von Mises-Smirnov, chi-square and White types. The application of these tests requires the simulation of unknown conditional statistic distributions $G(S|H_0)$ for applied tests with Monte Carlo method. As the result of comparative analysis of proposed tests by power the chi-square type test can be recommended as the most preferable one.

Keywords: reliability of one-shot devices, current status samples, maximum likelihood method, nonparametric estimator of distribution function, goodness-of-fit tests, accelerated failure time model, Monte Carlo method.

Введение. В результате испытаний на надежность устройств одноразового срабатывания в некоторые детерминированные моменты времени вместо выборки отказов получают данные о состоянии устройств на моменты времени тестирования. В случае успешного срабатывания устройства мы имеем цензурированное справа наблюдение; если же устройство не сработало, значит, отказ произошел до момента времени тестирования и мы получаем цензурированное слева наблюдение. Таким образом, полученная выборка будет содержать цензурированные слева и цензурированные справа наблюдения, при этом в выборке не будет ни одного полного наблюдения. Такие выборки являются частным случаем выборок интервальных наблюдений и называются выборками текущих состояний (current status data). Примерами устройств одноразового срабатывания служат, в первую очередь, устройства для крепления и расфиксации подвижных элементов конструкции космического аппарата: солнечных панелей, радиолокационных антенн, раскрываемых штанг приборов и прочего оборудования. Безотказность работы этих устройств непосредственно влияет на готовность космических аппаратов выполнять свои функции. Проблемы обеспечения безотказности функционирования механических устройств одноразового срабатывания на космических аппаратах рассматриваются в [1]. К устройствам одноразового срабатывания также относятся различные электровзрывные устройства, автомобильные подушки безопасности и др.

В последнее время большую популярность завоевали непараметрические методы, которые не требуют знания априорной информации о виде закона распределения результатов измерений. В [2; 3] исследовалась непараметрическая ОМП для выборок текущих состояний с учетом различных типов отказа. Кроме того, данные о текущем состоянии можно рассматривать как частный случай интервальных данных. В [4] Тернбуллом был предложен итерационный алгоритм вычисления непараметрической оценки функции надежности по интервальным данным, который применим и для рассматриваемых выборок.

Вследствие высокой надежности устройств одноразового срабатывания, за отведенное на эксперимент время может быть не выявлено ни одного неработоспособного устройства, поэтому испытания обычно проводят при повышенных нагрузках и по полученным данным строят регрессионную модель надежности, например, модель ускоренных испытаний [5; 6], по которой осуществляется прогноз надежности изделий для нормальных условий эксплуатации. В [7–9] представлен ЕМ-алгоритм для вычисления оценок максимального правдоподобия (ОМП) параметров модели ускоренных испытаний в случае экспоненциального распределения отказов и распределения Вейбулла.

Основной проблемой при построении вероятностной модели надежности по выборкам текущих состояний является проверка гипотезы об адекватности полученной модели. Классические критерии согласия, такие как критерий Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Андерсона–Дарлинга, χ^2 Пирсона, для выборок текущих состояний неприменимы. В литературе, посвященной статистическим методам анализа интервальных выборок, рассмотрены некоторые подходы к проверке статистической гипотезы о согласии. В частности, в [10] рассматривается подход, основанный на преобразовании выборки текущих состояний в псевдополную выборку, по которой и осуществляется проверка гипотезы о согласии. В [11] предлагается параметрический критерий проверки гипотезы о согласии H_0 против конкурирующих гипотез H_1, соответствующих более общим моделям. В [12] для проверки гипотезы о согласии по интервальным выборкам используется критерий типа χ^2, для вычисления статистики которого применяется процедура рандомизации. Однако рассмотренные подходы не учитывают специфику выборок текущих состояний, и их применение будет неэффективным.

В данной работе с использованием метода Монте-Карло исследуются статистические свойства ОМП параметров распределений в зависимости от способа выбора моментов тестирования устройств, а также предлагается алгоритм вычисления непараметрической ОМП функции распределения отказов на основе

выборок текущих состояний. Далее автором предлагаются критерии согласия для проверки адекватности вероятностных моделей надежности по выборкам текущих состояний и проводится исследование методами статистического моделирования мощности предложенных критериев.

Статистические свойства ОМП параметров по выборкам текущих состояний. Рассмотрим эксперимент на надежность, в котором n устройств одноразового срабатывания, принадлежащих одной генеральной совокупности, тестируются в моменты времени $t_1, t_2, \ldots, t_k$, $k \le n$. Обозначим через n_i количество объектов, тестируемых в момент времени t_i, $\sum_{i=1}^{k} n_i = n$. В результате эксперимента часть объектов успешно сработала, в то время как остальные оказались в неработоспособном состоянии. Таким образом, полученную выборку наблюдений можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{X}_n = \{(t_i, K_i, n_i),\ i = 1,\ \ldots, k\}, \qquad (1)$$

где K_i – количество устройств, оказавшихся в неработоспособном состоянии на момент времени тестирования t_i, что свидетельствует о том, что отказ произошел до момента времени t_i (цензурированные слева наблюдения).

Предположим, что наблюдаемая случайная величина T – время, в течение которого устройство находится в работоспособном состоянии, т. е. способно к безотказному срабатыванию, принадлежит параметрическому семейству распределений $F(t;\theta), \theta \in \Theta$. Неизвестный параметр θ (в общем случае векторный) можно оценить методом максимального правдоподобия. ОМП $\hat{\theta}$ параметра θ называется точка параметрического множества Θ, в которой функция правдоподобия

$$L\left(\mathbf{X}_n;\hat{\theta}\right) = \sup_{\theta\in\Theta} L\left(\mathbf{X}_n;\theta\right).$$

Логарифм функции правдоподобия для выборки текущих состояний вида (1) имеет вид

$$\ln L\left(\mathbf{X}_n;\theta\right) = \sum_{i=1}^{k}\left(K_i \ln F(t_i;\theta) + (n_i - K_i)\ln\left(1 - F(t_i;\theta)\right)\right).$$

Если функция правдоподобия дифференцируема по θ, то для нахождения ОМП векторного параметра $\theta = \left(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_s\right)^T$ решают систему уравнений правдоподобия:

$$\frac{\partial \ln L(\mathbf{X}_n,\theta)}{\partial \theta_i} = 0,\ i = 1,\ldots,s.$$

Широкое применение ОМП обусловлено тем, что при достаточно больших объемах выборок для них характерны следующие свойства.

1) асимптотическая несмещенность: $M\hat{\theta} \to \theta$, $n \to \infty$;

2) состоятельность: $\hat{\theta} \xrightarrow{P} \theta$, $n \to \infty$;

3) при выполнении условий регулярности модели ОМП обладают свойствами асимптотической эффективности и нормальности:

$$\sqrt{n}\left(\hat{\theta} - \theta\right) \xrightarrow{P} \xi \succ N\left(0, I_n^{-1}(\theta)\right),\ n \to \infty,$$

где $I_n(\theta)$ – информационное количество Фишера о параметре θ, содержащееся в выборке $\mathbf{X}_n$.

Информацией Фишера о параметре θ, содержащейся в выборке $\mathbf{X}_n$, называется дисперсия вклада выборки:

$$I_n(\theta) = D\left[U\left(\mathbf{X}_n;\theta\right)\right] = D\left[\frac{\partial \ln L\left(\mathbf{X}_n;\theta\right)}{\partial\theta}\right].$$

Поскольку $M\left[U\left(\mathbf{X}_n;\theta\right)\right] = 0$, то продифференцировав это выражение по θ, получим:

$$I_n(\theta) = -M\left[\frac{\partial^2 \ln L(\mathbf{X}_n;\theta)}{\partial\theta^2}\right] = \\ = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{F(t_i;\theta)\left(1 - F(t_i;\theta)\right)} \frac{\partial F(t_i;\theta)}{\partial\theta} \frac{\partial F(t_i;\theta)}{\partial\theta^T}. \qquad (2)$$

Матрица $I_n(\theta)$ зависит от моментов тестирования $t_1, t_2, \ldots, t_k$, следовательно, выбор моментов тестирования напрямую влияет на свойства и точность ОМП. Если до начала эксперимента на надежность устройств одноразового срабатывания имеется априорная информация о виде закона распределения отказов, то моменты времени тестирования и количество устройств, тестируемых в каждый момент времени, могут быть выбраны оптимальным образом в результате максимизации функционала от информационной матрицы Фишера (2).

Оптимальные моменты времени тестирования $t_1, t_2, \ldots, t_k$ устройств одноразового срабатывания будем искать в виде дискретного нормированного плана

$$\varepsilon_k = \begin{Bmatrix} t_1,\ t_2,\ \ldots,\ t_k \\ p_1, p_2, \ldots, p_k \end{Bmatrix},$$

где $\sum_{i=1}^{k} p_i = 1$, $p_i = n_i / n$, решая задачу

$$\det I_n(\theta) \to \max_{t_1, t_2, \ldots, t_k;\ n_1, \ldots, n_k} \qquad (3)$$

при ограничениях

$$0 < t_1 < t_2 < \ldots < t_k,\ \sum_{i=1}^{k} n_i = n,\ n_i \in \mathbf{N},\ i = \overline{1,k}.$$

В результате решения задачи (3) при различных объемах выборок были получены следующие оптимальные планы ε_k^* для различных предположений о виде распределения отказов:

– в случае экспоненциального распределения отказов с функцией плотности

$$f(t;\theta)=\frac{1}{\theta_1}\exp\left(-\frac{t}{\theta_1}\right),\ \theta_1>0,\ t>0$$

оптимальный план состоит из одной точки:

$$\varepsilon_1^*=\begin{Bmatrix}1.594\cdot\theta_1\\ 1\end{Bmatrix};$$

– в случае распределения Вейбулла с функцией плотности

$$f(t;\theta)=\frac{\theta_2}{\theta_1}\left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\theta_2-1}\exp\left(-\left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\theta_2}\right),\ \theta_1,\theta_2>0,\ t>0$$

оптимальный план состоит из двух моментов тестирования и имеет вид

$$\varepsilon_2^*=\begin{Bmatrix}(0,262\cdot\theta_1)^{1/\theta_2} & (2,665\cdot\theta_1)^{1/\theta_2}\\ 0,5 & 0,5\end{Bmatrix};$$

– в случае логнормального распределения с функцией плотности

$$f(t;\theta)=\frac{1}{t\cdot\theta_2\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2\theta_2^2}\ln^2\left(\frac{t}{\theta_1}\right)\right),$$
$$\theta_1,\theta_2>0,\ t>0$$

оптимальный план также является инвариантным относительно значений параметров:

$$\varepsilon_2^*=\begin{Bmatrix}\theta_1\cdot 0,320^{\theta_2} & \theta_1\cdot 3,121^{\theta_2}\\ 0,5 & 0,5\end{Bmatrix};$$

– в случае гамма-распределения моменты времени тестирования не являются инвариантными относительно значений параметра формы; при $\theta_2=1$ полученный оптимальный план имеет вид

$$\varepsilon_2^*=\begin{Bmatrix}0,140\cdot\theta_1 & 2,205\cdot\theta_1\\ 0,5 & 0,5\end{Bmatrix}.$$

Интересным оказался тот факт, что оптимальное время тестирования для экспоненциального распределения совпало с точкой асимптотически оптимального группирования, полученной в результате минимизации потерь информации Фишера от группирования [13]. Однако для других рассмотренных распределений точки оптимального плана несколько отличаются от точек асимптотически оптимального группирования.

Об эффективности оценивания параметров по выборке текущих состояний по сравнению с оцениванием по полной выборке будем судить по величине отношения $I_n(\theta)/I_n^*(\theta)$, где $I_n^*(\theta)$ – количество информации Фишера в полной выборке.

В табл. 1 для рассматриваемых законов распределения представлены либо значения $I_n(\theta)/I_n^*(\theta)$ для скалярных параметров, либо значения отношения определителей соответствующих информационных матриц $\det I_n(\theta)/\det I_n^*(\theta)$ в случае векторного параметра в зависимости от плана эксперимента. Моменты времени тестирования, за исключением случая использования оптимального плана, выбирались таким образом, чтобы вероятности попадания в интервалы между соседними моментами тестирования были равными:

$$t_i=F^{-1}\left(\frac{i}{k+1}\right),\ i=\overline{1,k},\qquad(4)$$

где $F^{-1}(\cdot)$ – функция, обратная к функции распределения $F(t)$.

Асимптотическая дисперсия является теоретической характеристикой точности оценивания. Реальную же картину того, насколько точно можно оценить параметры закона по выборке текущих состояний в зависимости от объема выборки *n*, могут дать результаты исследования методами статистического моделирования. Для этого необходимо оценить величину относительной эффективности: $D\hat{\theta}^*/D\hat{\theta}$ – в случае скалярного параметра или $\det D\hat{\theta}^*/\det D\hat{\theta}$ – в случае векторного параметра, где $\hat{\theta}^*$ – ОМП неизвестного параметра распределения по полной выборке, $\hat{\theta}$ – ОМП по выборке текущих состояний.

Рассмотрим изменение относительной эффективности оценивания в зависимости от степени цензурирования и объема выборки *n* на примере ОМП параметров масштаба и формы распределения Вейбулла. Результаты моделирования представлены в табл. 2. Количество *N* моделируемых выборок, по которым исследовались законы распределения оценок по выборкам объема *n*, было взято равным 100 000.

Таблица 1

Отношение количества информации Фишера в выборке текущих состояний к количеству информации в полной

	О параметре экспоненциального распределения	О векторе параметров распределения Вейбулла	О векторе параметров логнормального распределения	О векторе параметров гамма-распределения, $\theta_2=1$
Опт.	0,6476	0,0638	0,0993	0,0361
$k=1$	0,4805	–	–	–
$k=2$	0,4661	0,0300	0,0328	0,0112
$k=5$	0,4442	0,0535	0,0579	0,0199
$k=10$	0,4298	0,0605	0,0648	0,0224
$k=20$	0,4193	0,0626	0,0666	0,0230
$k=50$	0,4110	0,0627	0,0663	0,0229

Таблица 2

Относительная эффективность оценивания вектора параметров распределения Вейбулла по выборкам текущих состояний по сравнению с оцениванием по полной выборке в зависимости от объема выборки *n*

	$n = 200$	$n = 300$	$n = 500$	$n = 700$	$n = 1000$
Опт. ε_2^*	0,0563	0,0577	0,0603	0,0619	0,0621
$k = 2$	0,0216	0,0250	0,0271	0,0279	0,0285
$k = 5$	0,0491	0,0495	0,0512	0,0523	0,0518
$k = 10$	0,0554	0,0568	0,0579	0,0588	0,0585

Как видно из табл. 2, с ростом объема выборок величина $\det D\hat{\theta}^* / \det D\hat{\theta}$ стремится к $\det I_n(\theta) / \det I_n^*(\theta)$. В случае использования оптимального плана ε_2^* при больших объемах выборок ОМП обладает меньшей дисперсией по сравнению со случаями использования большего числа моментов тестирования k. Аналогичные закономерности были получены при исследовании свойств ОМП параметров логнормального и гамма-распределения.

Непараметрическая оценка функции распределения по выборкам текущих состояний. В условиях отсутствия априорной информации о распределении $F(t)$ оценку неизвестной функции распределения в точках $t_1, t_2, \ldots, t_k$ можно найти в результате условной максимизации функции правдоподобия:

$$\ln L(\mathbf{X}_n) = \sum_{i=1}^{k} \left(K_i \ln F_i + (n_i - K_i) \ln(1 - F_i) \right) \to \max_{F_1, \ldots, F_k}$$

при ограничениях

$$F_1 \le F_2 \le \ldots \le F_k, \; F_1 \ge 0, \; \ldots, \; F_k \ge 0,$$

где через $F_1, F_2, \ldots, F_k$ для краткости обозначены значения $F(t_1), F(t_2), \ldots, F(t_k)$ соответственно.

Опираясь на теорему Лагранжа, несложно показать, что решение сформулированной задачи условной оптимизации может быть найдено в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Вычислить начальные значения $\hat{F}_i = \dfrac{K_i}{n_i}$.

2. Если найденные значения $\hat{F}_1, \ldots, \hat{F}_k$ удовлетворяют ограничениям $\hat{F}_1 \le \hat{F}_2 \le \ldots \le \hat{F}_k$, то решение найдено, иначе перейти на шаг 3.

3. Найти наименьший номер $i < k$, для которого $\hat{F}_i > \hat{F}_{i+1}$.

4. Пересчитать значения, удовлетворяющие неравенству $\hat{F}_i > \hat{F}_{i+1} \ge \ldots \ge \hat{F}_{i+m}$, следующим образом:

$$\hat{F}_i = \ldots = \hat{F}_{i+m} = \frac{\sum_{j=i}^{i+m} K_j}{\sum_{j=i}^{i+m} n_j}.$$

5. Повторять шаги 3, 4 до тех пор, пока не выполнится ограничение $\hat{F}_1 \le \hat{F}_2 \le \ldots \le \hat{F}_k$.

Таким образом, непараметрическую оценку неизвестной функции распределения $F(t)$ по выборке текущих состояний (1) можно записать следующим образом:

$$\hat{F}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1, \\ \hat{F}_1, & t_1 \le t < t_2, \\ \ldots \\ \hat{F}_k, & t_k \le t. \end{cases} \tag{5}$$

С использованием методов статистического моделирования исследуем скорость сходимости оценки (5) к истинной функции распределения. В качестве расстояния между непараметрической оценкой и соответствующей функцией распределения рассмотрим статистику Колмогорова

$$D_n = \sup_{0<t<t_k} \left| \hat{F}(t) - F(t) \right|.$$

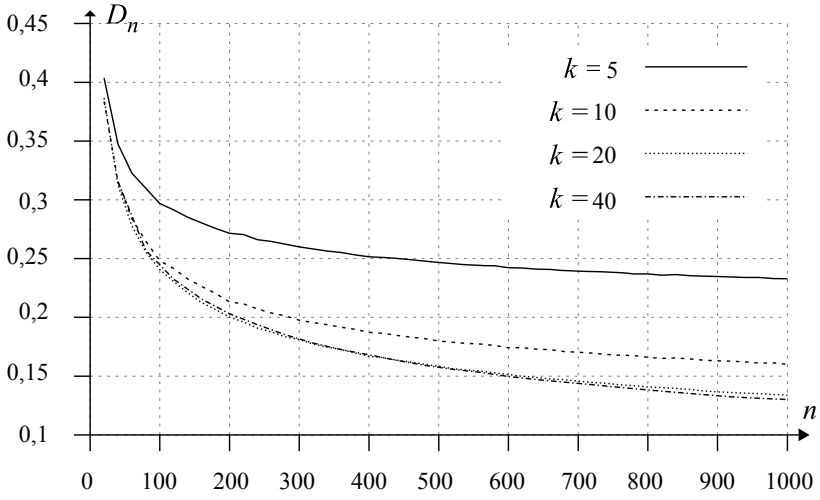
Для построения зависимости расстояния между оценкой $\hat{F}(t)$ и истинной функцией распределения $F(t)$ от объема выборки при фиксированном количестве моментов тестирования k генерировались выборки вида (1) объемом n из распределения $F(t)$, по каждой из которых вычислялись значения статистики D_n. Задаваемые моменты тестирования (моменты испытания устройств) вычислялись в соответствии с (4).

Исследования были проведены при объемах выборок $n = 20, 40, 60, \ldots, 980, 1000$ и $k = \overline{2, n}$. На рисунке представлены графики полученных зависимостей значения D_n от n, усредненного по 10000 выборок, при $k = 5, 10, 20$ и 40.

Как видно на рисунке, расстояние от непараметрической оценки $\hat{F}(t)$ до истинной функции распределения $F(t)$ с ростом объема выборки и числа моментов тестирования уменьшается. Полученные зависимости хорошо аппроксимируются степенными функциями вида $MD_n = \alpha_0 n^{-\alpha_1}$. В частности, вычисленные с использованием метода наименьших квадратов оценки параметров этой зависимости и соответствующий коэффициент детерминации при различных k принимают следующие значения:

– при $k = 5$: $\hat{\alpha}_0 = 0{,}53$, $\hat{\alpha}_1 = 0{,}12$, $R^2 = 0{,}971$;
– при $k = 10$: $\hat{\alpha}_0 = 0{,}66$, $\hat{\alpha}_1 = 0{,}20$, $R^2 = 0{,}990$;
– при $k = 20$: $\hat{\alpha}_0 = 0{,}82$, $\hat{\alpha}_1 = 0{,}26$, $R^2 = 0{,}998$;
– при $k = 40$: $\hat{\alpha}_0 = 0{,}87$, $\hat{\alpha}_1 = 0{,}27$, $R^2 = 0{,}999$.

Естественно, что скорость сходимости с ростом числа моментов тестирования увеличивается. В результате проведенного исследования можно говорить о состоятельности непараметрической оценки $\hat{F}(t)$.



Зависимость усредненного расстояния Колмогорова D_n от объема выборки при различном числе моментов тестирования k

Построение критериев согласия для выборок текущих состояний. Задача проверки адекватности модели надежности, полученной по выборке текущих состояний, приводит к необходимости построения критериев согласия, способных по таким данным осуществлять проверку статистической гипотезы вида

$$H_0 : F(t) \in \{F_0(t;\theta),\ \theta \in \Theta\}.$$

Рассмотрим классический подход, основанный на том, что в качестве статистики соответствующего критерия берется расстояние между некоторой непараметрической оценкой функции распределения и $F_0(t;\theta)$. В данном случае непараметрическая оценка $\hat{F}(t)$ неизвестной функции распределения $F(t)$ вычисляется в соответствии с выражением (5).

Статистику Колмогорова D_n, рассмотренную в предыдущем разделе в качестве расстояния между непараметрической оценкой $\hat{F}(t)$ и истинной функцией распределения $F(t)$, можно взять за основу при построении критерия согласия для выборок текущих состояний. В этом случае статистика критерия типа Колмогорова имеет вид

$$D_n = \sup_{0<t<t_k} \left|\hat{F}(t) - F_0(t;\theta)\right|. \qquad (6)$$

Аналогично, статистику критерия типа Крамера–Мизеса–Смирнова можно определить следующим образом:

$$\omega_n^2 = \int_0^{t_k} \left(\hat{F}(t) - F_0(t;\theta)\right)^2 dF_0(t;\theta). \qquad (7)$$

В качестве статистики критерия согласия может также выступать статистика типа χ^2 вида

$$Z_n^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(U_i - E_i)^2}{E_i}, \qquad (8)$$

где $U_i = n_i \hat{F}(t_i)$ – эмпирическое число отказов к моменту времени t_i; $E_i = n_i F_0(t_i;\theta)$ – ожидаемое число отказов к моменту времени t_i в соответствии с проверяемой гипотезой, $i = \overline{1,k}$.

При проверке сложной гипотезы в качестве значений параметров распределения $F_0(t;\theta)$ используется их оценка, полученная, например, методом максимального правдоподобия.

В [14] Уайтом был предложен подход к выявлению неверной спецификации вероятностной модели в случае, когда параметры модели оцениваются методом максимального правдоподобия. Его подход основан на различном представлении информационного количества Фишера о параметре регулярного распределения, содержащегося в выборке. В данной работе для проверки сложной гипотезы о согласии предлагается использовать статистику вида

$$S_W = \sqrt{n}\,\frac{\left|\det A_n\left(\hat{\theta}\right) - \det B_n\left(\hat{\theta}\right)\right|}{\det B_n\left(\hat{\theta}\right)}, \qquad (9)$$

где

$$A_n\left(\hat{\theta}\right) = -\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k}\left[K_i \frac{\partial^2 \ln F_0\left(t_i;\hat{\theta}\right)}{\partial\theta^2} + \left(n_i - K_i\right)\frac{\partial^2 \ln\left(1 - F_0\left(t_i;\hat{\theta}\right)\right)}{\partial\theta^2}\right],$$

$$B_n\left(\hat{\theta}\right) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k} K_i \frac{\partial \ln F_0\left(t_i;\hat{\theta}\right)}{\partial\theta}\left(\frac{\partial \ln F_0\left(t_i;\hat{\theta}\right)}{\partial\theta}\right)^T +$$

$$+\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k}\left(n_i - K_i\right)\frac{\partial \ln\left(1 - F_0\left(t_i;\hat{\theta}\right)\right)}{\partial\theta}\left(\frac{\partial \ln\left(1 - F_0\left(t_i;\hat{\theta}\right)\right)}{\partial\theta}\right)^T,$$

$\hat{\theta}$ – ОМП параметра распределения $F_0(t;\theta)$. При справедливости гипотезы H_0 оценки информационной матрицы A_n и B_n должны быть близкими, в противном случае, если модель $F_0(t;\theta)$ неверна, то различие между данными оценками будет существенным.

Гипотеза о согласии H_0 отвергается при больших значениях статистик (6)–(9).

Проверку гипотез с нахождением неизвестных условных распределений $G(S \mid H_0)$ статистик применяемых критериев с использованием метода Монте-Карло можно осуществлять на основе следующего алгоритма.

1. По имеющейся выборке текущих состояний $\mathbf{X}_n$ методом максимального правдоподобия найти оценку $\hat{\theta}$ неизвестного вектора параметров распределения $F_0(t;\theta)$ и вычислить значение S_n^* статистики соответствующего критерия.

2. Смоделировать эмпирическое распределение $G_N(S_n \mid H_0)$ статистики критерия:

2.1. Сгенерировать полную выборку псевдослучайных величин объемом n в соответствии с распределением $F_0(t;\hat{\theta})$.

2.2. В соответствии с заданными в исходной выборке $\mathbf{X}_n$ моментами времени тестирования $t_1, t_2, \ldots, t_k$ и количеством тестируемых в этот момент элементов $n_1, n_2, \ldots, n_k$ преобразовать полученную на шаге 2 полную выборку в выборку текущих состояний $\mathbf{Y}_n$.

2.3. По выборке текущих состояний $\mathbf{Y}_n$ оценить параметры распределения $F_0(t;\theta)$ и вычислить значение статистики соответствующего критерия согласия (6)–(8) или (9).

Повторить шаги 2.1–2.3 N раз. В результате получается выборка статистик $\left\{S_n^1, S_n^2, \ldots, S_n^N\right\}$.

3. По смоделированной выборке статистик $\left\{S_n^1, S_n^2, \ldots, S_n^N\right\}$ объемом N строится эмпирическая функция распределения $G_N(S_n \mid H_0)$. Проверяемая гипотеза H_0 отклоняется, если $1 - G_N(S_n^* \mid H_0) < \alpha$, где S_n^* – значение статистики соответствующего критерия согласия по выборке $\mathbf{X}_n$.

Количество моделируемых выборок N следует выбирать достаточно большим. В частности, при $N = 16600$ абсолютная погрешность моделирования [13]

$$\left|G_N(S_n \mid H_0) - G(S_n \mid H_0)\right| \le 0{,}01 .$$

Отметим, что п. 2 алгоритма может выполняться в интерактивном режиме, обеспечивая нахождение $G_N(S_n \mid H_0)$ и оценку достигнутого уровня значимости $1 - G_N(S_n^* \mid H_0)$ в ходе проводимого анализа.

Мощность критериев согласия по выборкам текущих состояний. Для оценки мощности и сравнительного анализа критериев по выборкам текущих состояний моделировались распределения статистик по законам, соответствующим справедливости проверяемой гипотезы H_0 или конкурирующей H_1. В качестве примера рассмотрим результаты исследования мощности критериев при проверке сложной гипотезы H_0 о принадлежности выборки экспоненциальному закону распределения с неизвестным параметром масштаба $\theta_1 > 0$ относительно шести различных конкурирующих гипотез:

– H_1^1: распределение Вейбулла с параметрами $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 0{,}5$;

– H_1^2: распределение Вейбулла с параметрами $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 1{,}5$;

– H_1^3: распределение Вейбулла с параметрами $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 2$;

– H_1^4: гамма-распределение с параметрами $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 0{,}5$;

– H_1^5: гамма-распределение с параметрами $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 1{,}5$;

– H_1^6: гамма-распределение с параметрами $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 2$.

В табл. 3 приведены оценки мощности рассмотренных критериев согласия при различном числе моментов тестирования и объеме выборки $n = 200$. Моменты тестирования выбирались в соответствии с выражением (4). Оценки мощности вычислялись при уровне значимости $\alpha = 0{,}01$.

Анализируя результаты, представленные в табл. 3, можно отметить, что с ростом числа моментов тестирования мощность критериев увеличивается. Выбор критерия, наиболее предпочтительного по мощности, является неоднозначным: относительно конкурирующих гипотез H_1^2, H_1^3, H_1^5 и H_1^6 наиболее мощным среди рассматриваемых оказывается критерий типа Крамера–Мизеса–Смирнова, в то же время относительно H_1^1 и H_1^4 он сильно проигрывает критериям Уайта и типа χ^2. Если принять во внимание, что в первом случае критерий типа χ^2 на основе статистики (8) по мощности лишь незначительно уступает критерию типа Крамера–Мизеса–Смирнова, а во втором – существенно превосходит его, то в качестве наиболее предпочтительного (среди критериев, предложенных в данной работе) можно рекомендовать критерий типа χ^2.

Модель ускоренных испытаний. Испытания на надежность, как правило, проводятся при повышенных нагрузках, в качестве которых могут выступать температура, напряжение, давление и другие условия. Обозначим вектор объясняющих переменных (нагрузок) через $\overline{x} = \left(x^{(1)}, x^{(2)}, \ldots, x^{(l)}\right)^T$. Диапазон значений переменных $x^{(1)}, x^{(2)}, \ldots, x^{(l)}$ определяется условиями эксперимента и представляет собой отрезок числовой прямой. В момент времени t_i устройства тестируются при m_i различных значениях вектора нагрузок: $\overline{x}_{i1}, \overline{x}_{i2}, \ldots, \overline{x}_{im_i}$, $i = \overline{1,k}$.

Таблица 3

Оценки мощности критериев согласия для выборок текущих состояний при различном числе моментов тестирования, выбранных в соответствии с равновероятным разбиением

Тип критерия согласия	H_0: экспоненциальное распределение					
	H_1^1	H_1^2	H_1^3	H_1^4	H_1^5	H_1^6
$k = 5$						
Колмогорова	0,63	0,31	0,83	0,38	0,14	0,37
Крамера–Мизеса–Смирнова	0,69	0,50	0,89	0,39	0,27	0,54
Хи-квадрат	1,00	0,49	0,85	0,94	0,26	0,52
Уайта	1,00	0,40	0,52	0,91	0,27	0,42
$k = 10$						
Колмогорова	0,71	0,45	0,84	0,39	0,23	0,45
Крамера–Мизеса–Смирнова	0,90	0,64	0,97	0,58	0,34	0,68
Хи-квадрат	1,00	0,54	0,90	0,96	0,29	0,58
Уайта	1,00	0,45	0,60	0,93	0,29	0,47
$k = 20$						
Колмогорова	0,85	0,53	0,93	0,50	0,27	0,56
Крамера–Мизеса–Смирнова	0,95	0,70	0,98	0,66	0,38	0,74
Хи-квадрат	1,00	0,59	0,94	0,96	0,32	0,64
Уайта	1,00	0,48	0,64	0,95	0,30	0,50

Таким образом, все n устройств можно разделить на $M = \sum_{i=1}^{k} m_i$ групп в соответствии с различными условиями проведения испытаний (различными моментами времени тестирования и значениями вектора объясняющих переменных). Обозначим через n_{ij} количество устройств, тестируемых в i-й момент времени при значении вектора объясняющих переменных $\overline{x}_{ij}$, $\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m_i} n_{ij} = n$. Полученную в результате эксперимента выборку текущих состояний можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{X}_n = \left\{(t_i, \overline{x}_{ij}, K_{ij}, n_{ij}),\ i = 1,\ ..., k,\ j = 1,\ ..., m_i\right\}, \quad (10)$$

где K_{ij} – количество устройств, оказавшихся в неработоспособном состоянии на момент времени тестирования t_i при значении вектора нагрузок $\overline{x}_{ij} = \left(x_{ij}^{(1)}, x_{ij}^{(2)},\ ..., x_{ij}^{(l)}\right)^T$.

Модель ускоренных отказов (Accelerated Failure Time model – AFT) определяется через базовую функцию надежности следующим образом:

$$S(t \mid \overline{x}) = S_0\left(\frac{t}{r(\overline{x};\beta)}\right), \quad (11)$$

где $r(\overline{x};\beta)$ – положительно определенная функция, которая чаще всего параметризуется следующим образом:

$$r(\overline{x};\beta) = \exp\left\{\beta_0 + \beta_1 x^{(1)} + ... + \beta_l x^{(l)}\right\},$$

$S_0(t) = 1 - F_0(t)$ – базовая функция надежности. В параметрических AFT-моделях базовая функция надежности определяется некоторым параметрическим семейством распределений $F_0(t;\theta)$. В качестве базовых законов, как правило, используются следующие распределения: экспоненциальное, логнормальное, Вейбулла, гамма-распределение и др.

Оценки максимального правдоподобия неизвестных параметров AFT-модели по выборке текущих состояний (10) могут находиться в результате максимизации логарифмической функции правдоподобия

$$\ln L\left(\mathbf{X}_n;\beta,\theta\right) = \\ = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m_i}\left[\left(\begin{array}{l} K_{ij}\ln F_0\left(\dfrac{t_i}{r(\overline{x}_{ij};\beta)};\theta\right) + \\ +(n_{ij} - K_{ij})\ln\left(1 - F_0\left(\dfrac{t_i}{r(\overline{x}_{ij};\beta)};\theta\right)\right)\end{array}\right)\right]$$

по параметрам β и θ.

Для проверки адекватности полученной AFT-модели формируется выборка так называемых остатков [15]

$$\mathbf{R}_n = \left\{\left(R_{ij} = \frac{t_i}{r(\overline{x}_{ij};\beta)}, K_{ij}, n_{ij}\right), i = 1,\ ..., k, j = 1,\ ..., m_i\right\},$$

которая представляет собой выборку текущих состояний вида (1). Если модель (11) верна, то выборка остатков $\mathbf{R}_n$ должна принадлежать базовому закону распределения $F_0(t;\hat{\theta})$ с единичным параметром масштаба. Для проверки гипотезы о согласии выборки остатков с базовым законом распределения можно использовать предложенные в данной работе критерии типа Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, χ^2 и Уайта.

Заключение. В данной работе рассмотрены основные задачи, возникающие при построении вероятностной модели: непараметрическое оценивание функции распределения, оценивание параметров распределений и проверка статистической гипотезы о согласии. В результате исследования точности оценок максимального правдоподобия по выборкам

текущих состояний показано, что увеличение числа моментов тестирования k не приводит к повышению точности ОМП параметров распределений. Для распределений Вейбулла, гамма, экспоненциального и логнормального найдены оптимальные моменты времени тестирования устройств одноразового срабатывания в виде дискретных нормированных планов эксперимента, инвариантных относительно значений параметров (за исключением параметра формы гамма-распределения).

Предложен алгоритм построения непараметрической оценки функции распределения по выборкам текущих состояний. Показано, что с ростом объема выборки и числа моментов тестирования расстояние Колмогорова между непараметрической оценкой и истинной функцией распределения стремится к нулю, что указывает на ее состоятельность.

Для проверки адекватности построенной вероятностной модели по выборке текущих состояний в работе предложены критерии согласия, применение которых предполагает нахождение неизвестного условного распределения статистики критерия с использованием метода Монте-Карло. В результате сравнительного анализа предложенных критериев по мощности сделан вывод о предпочтительности критерия типа хи-квадрат.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 2.541.2014K от 17.07.2014 г.

Acknowledgment. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, as the project part of the State task (project 2.541.2014K from 17.07.2014).

Библиографические ссылки

1. Похабов Ю. П. Особенности обеспечения безотказности функционирования механических устройств одноразового срабатывания на космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 96–100.

2. Jewell N. P., Van der Laan M. J., Henneman T. Nonparametric estimation from current status data with competing risks // Biometrika. 2003. Vol. 90. P. 183–197.

3. Groeneboom P., Maathuis M. H., Wellner J. A. Current status data with competing risks: Consistency and rates of convergence of the MLE // Ann. Statist. 2008. Vol. 36, No. 3. P. 1031–1063.

4. Turnbull B. W. The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored, and truncated data // J. R. Statist. Soc. Ser. B. 1976. Vol. 38. P. 290–295.

5. Bagdonavicius V., Nikulin M. Accelerated life models: modeling and statistical analysis. Boca Raton, Chapman and Hall/CRC, 2002. 360 p.

6. Галанова Н. С., Лемешко Б. Ю., Чимитова Е. В. Применение непараметрических критериев согласия к проверке адекватности моделей ускоренных испытаний // Автометрия. 2012. № 6. С. 53–68.

7. Balakrishnan N., Ling M. H. Multiple-stress model for one-shot device testing data under exponential distribution // IEEE Transactions on Reliability. 2012. Vol. 61. P. 809–821.

8. Balakrishnan N., Ling M. H. EM algorithm for one-shot device testing under the exponential distribution // Computational Statistics and Data Analysis. 2012. Vol. 56. P. 502–509.

9. Balakrishnan N., Ling M. H. Expectation maximization algorithm for one-shot device accelerated life testing with Weibull lifetimes, and variable parameters over stress // IEEE Transactions on Reliability. 2013. Vol. 62. P. 537–551.

10. Ren J. J., Goodness-of-fit tests with interval censored data // Scandinavian Journal of Statistics. 2003. Vol. 30. P. 211–226.

11. Nysen R., Aerts M., Faes C. Testing goodness-of-fit of parametric models for censored data // Statistics in Medicine. 2012. Vol. 31. P. 2374–2385.

12. Calle M. L., G'omez G. A sampling-based chi-squared test for interval-censored data // In Statistical models and methods for biomedical and technical systems / Editors: F. Vonta, M. Nikulin, N. Limnios, H. Huber-Carol Birkhauser, 2008. 556 p.

13. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход : монография / Б. Ю. Лемешко [и др.]. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. 888 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

14. White H. Maximum Likelihood Estimation of Misspecified Models // Econometrica. 1982. Vol. 50. P. 1–25.

15. Balakrishnan N. [et al.]. Testing Goodness of Fit of Parametric AFT and PH Models with Residuals // Communications in Statistics – Simulation and Computation. 2013. Vol. 42, № 6. P. 1352–1367.

References

1. Pokhabov Yu. P. [Distinctive features of maintenance of flawlessness of nonreusable mechanical devices functioning on space vehicles]. *Vestnik SibGAU.* 2012, no. 2 (42), p. 96–100 (In Russ.).

2. Jewell N. P., Van der Laan M. J., Henneman T. Nonparametric estimation from current status data with competing risks. *Biometrika,* 2003, vol. 90, p. 183–197.

3. Groeneboom P., Maathuis M. H., Wellner J. A. Current status data with competing risks: Consistency and rates of convergence of the MLE. *Ann. Statist*., 2008, vol. 36, no. 3, p. 1031–1063.

4. Turnbull B. W. The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored, and truncated data. *J. R. Statist. Soc. Ser. B.,* 1976, vol. 38, p. 290–295.

5. Bagdonavicius V., Nikulin M. *Accelerated life models: modeling and statistical analysis*. Boca Raton, Chapman and Hall/CRC, 2002, 360 p.

6. Galanova N. S., Lemeshko B. Yu., Chimitova E. V. Using nonparametric goodness-of-fit tests to validate accelerated failure time models. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, no. 48 (6), p. 580–592.

7. Balakrishnan N., Ling M. H. Multiple-stress model for one-shot device testing data under exponential distribution. *IEEE Transactions on Reliability,* 2012, vol. 61, p. 809–821.

8. Balakrishnan N., Ling M. H. EM algorithm for one-shot device testing under the exponential distribution. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2012, vol. 56, p. 502–509.

9. Balakrishnan N., Ling M. H. Expectation maximization algorithm for one-shot device accelerated life testing with Weibull lifetimes, and variable parameters over stress. *IEEE Transactions on Reliability,* 2013, vol. 62, p. 537–551.

10. Ren J. J. Goodness-of-fit tests with interval censored data. *Scandinavian Journal of Statistics*, 2003, vol. 30, p. 211–226.

11. Nysen R., Aerts M., Faes C. Testing goodness-of-fit of parametric models for censored data. *Statistics in Medicine*, 2012, vol. 31, p. 2374–2385.

12. Calle M. L., G'omez G. A sampling-based chi-squared test for interval-censored data. *In Statistical models and methods for biomedical and technical systems*. Editors: Vonta F., Nikulin M., Limnios N., Huber-Carol H. Birkhauser, 2008, 556 p.

13. Lemeshko B. Yu., Lemeshko S. B., Postovalov S. N., Chimitova E. V. *Statisticheskiy analiz dannykh, modelirovanie i issledovanie veroyatnostnykh zakonomernostey. Komp'yuternyy podkhod* [Statistical data analysis, simulation and study of probability regularities computer approach]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, 888 p.

14. White H. Maximum Likelihood Estimation of Misspecified Models. *Econometrica*, 1982, vol. 50, p. 1–25.

15. Balakrishnan N., Chimitova E., Galanova N., Vedernikova M. Testing Goodness-of-Fit of Parametric AFT and PH Models with Residuals. *Communications in Statistics - Simulation and Computation,* 2013, vol. 42, no. 6, p. 1352–1367.

© Чимитова Е. В., 2015

UDC 519.234

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 153–158

APPLICATION OF FINITE AUTOMATA WITH GENETIC ALGORITHMS IN JAVASCRIPT FOR DETERMINATION OF MANPOWER SYSTEM CONTROL

A. Škraba*, D. Kofjač, A. Žnidaršič, Č. Rozman, M. Maletič

University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences
Cybernetics & Decision Support Systems Laboratory
Kidričeva cesta, 55a, Kranj, SI-4000, Slovenia
*E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si

The strict hierarchical manpower system is modeled in the state space where the desired number of men in particular rank is determined by predefined trajectory function. The transition model is represented by the principles of System Dynamics where each rank is represented as the state element and transition as the flow. The basis for the model is the structure of the exponential delay chain with additional outflows from particular states. The strategy for achieving the desired states is determined by the application of the genetic algorithms which are implemented in JavaScript as well as the System Dynamics model. Parameter boundaries were taken into consideration which was determined according to the historical data. Predetermination of the desired system states by the set of exponential functions reduced the optimization burden. The optimization problem was defined as the minimization of the sum of quadratic difference between desired and actual states in all ranks for the observed time horizon. Time boundaries in considered optimization problem were not constant which contributes to the complexity of the addressed optimization task. The six state finite automaton code realization is described which prevents the oscillations in the strategies. The algorithm for integration of system dynamics model and genetic algorithm with finite automaton is described.

Keywords: manpower system, finite automata, genetic algorithm.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 153–158

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ С ГЕНЕТИЧЕСКИМИ АЛГОРИТМАМИ В JAVASCRIPT ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

А. Шкраба*, Д. Кофьяч, А. Жнидаршич, Ч. Розман, М. Малетич

Университет Марибора, факультет организационный наук
Лаборатория кибернетики и систем поддержки принятия решений
Словения, SI-4000, Крань, ул. Кидричева 55а
*E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si

Строго иерархическая система управления человеческими ресурсами моделируется в пространстве состояний, в котором требуемое число работников определенного ранга определятся функцией предписанной траектории. Модель переходов основана на принципах системной динамики, когда каждый ранг описывается как элемент пространства состояний, а каждый переход – как поток. Основой модели является структура цепи с экспоненциальным запаздыванием с аддитивными выходными потоками для некоторых состояний. Стратегия достижения требуемого состояния определяется применением генетических алгоритмов, реализованных на JavaScript, а также моделью системной динамики. Учитываются ограничения на параметры, определенные в соответствии с предысторией. Предопределение требуемых состояний системы множеством экспоненциальных функций снижает трудности оптимизации. Задача оптимизации определяется как минимизация суммы квадратичных разностей между требуемыми и реальными состояниями всех рангов на наблюдаемом горизонте времени. Временные ограничения в рассматриваемой оптимизационной задаче не являются постоянными величинами, что усложняет эту задачу. Описывается реализация кода конечного автомата с шестью состояниями, позволяющего избежать осцилляций в стратегиях управления. Описывается также алгоритм, интегрирующий модель системной динамики и генетический алгоритм с помощью конечного автомата.

Ключевые слова: управление человеческими ресурсами, конечные автоматы, генетический алгоритм.

Introduction. Controlling of hierarchical manpower system such as military is demanding task [1–6] since the control problem includes several stochastic variables which should be considered, such as time variant boundaries on recruitment, promotions, retirements and wastages. The paper describes the methodology which was developed for the Slovenian Army restructuring [1; 7] where the new numbers of officers in the highest eight ranks should be determined. Due to the new standards, the new ratio should be established between the number of officers and number of soldiers. The structure of the system is shown in fig. 1. The system is modelled as the cascading exponential delay with the outflows as the wastages, i. e. fluctuations from the army. The input $u(t)$ to the system represents recruitment which influences the inflow R_0 to the first element x_1 which represents the level of the first rank (x_1) members (lowest rank). According to the promotion factor r_1 the transitions from rank x_1 to rank x_2 are made. The fluctuations from the rank x_1 are determined by the number of the x_1 rank members and the fluctuation factor a. Outflow element F_A represents the wastage, i. e. the case where the member of the rank leaves the army. This structure is repeated arbitrarily however in our case eight ranks were considered. The system also does not allow for direct input to the particular rank x; the way to the higher ranks is only possible to the recruitment to the first rank, x_1 therefore the system is strict hierarchical. In order to define the dynamics of the system the discrete state space is applied in the form $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k)$ [1]. State vector $\mathbf{x}$ represents the number of men in particular rank whereas matrix of coefficients $\mathbf{A}$ represents promotion factors r and wastage factors f. The only input to the system is recruitment represented by the $\mathbf{B}\mathbf{u}(k)$ term in the discrete state space.

In order to restructure the army manpower system, the recruitments, promotions, wastages and retirement should be determined in such a way, that new, desired numbers of man in particular rank x are achieved in minimal time. The solutions should not exercise the oscillations since this would lead to the undesired adaptation of training facilities and number of instructors. Another limitation that should be considered, is that the number of recruitments, promotions, wastages and retirement should not deviate significantly from the average numbers in previous 10 years. The novelty of the approach is twofold, on one side, the manpower system is modelled by the System Dynamics methodology, which is easy to understand, on the other side, the model is integrated with the Finite Automata in order to avoid the undesired oscillations in the strategy. Besides, we have developed technical realization of the system in JavaScript which provides new opportunities to apply the developed algorithm in the cloud as well as in the embedded devices [8].

Methodology description. For each rank x, the desired number of man is stated by the Human Resource department in the Slovenian army. This were only the final numbers of men that should be achieved in particular ranks x. Since the system is described by the model of exponential delay chain, it is anticipated, that the transitions will follow exponential functions. By anticipating the system response, the optimization burden could be reduced by the predetermination of the trajectories for states $\mathbf{x}$. The response of the system will be exercised as the exponential approach to the goal values. By the determination of the desired response function one can reduce the optimization search space [9; 10]. In our case we defined the desired response by the function, describing the way in which the number of men in particular rank x should be reached. The following function has been defined:

$$f(k) = x_i + \frac{(x_0 - x_i)(k_i - k)}{k_i} e^{-pk}, \qquad (1)$$

where x_0, x_i represent initial and final value of the state variable x, k_i is terminal time; k is simulation time and $p \in [0, \infty]$ is importance factor which determines the rate by which the goal is reached. The optimization problem where we want to achieve the desired values, marked with $\mathbf{z}$ in the equation (2) considers the minimal distance to the desired values function defined by equation (1):

$$\min_{u,r,f} J = \sum_{k=1}^{t_q} (\mathbf{z}(k) - \mathbf{x}(k))^T \mathrm{G} (\mathbf{z}(k) - \mathbf{x}(k)) \qquad (2)$$

subject to

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{LB}(k) &\le \mathbf{u}(k) \le \mathbf{u}_{UB}(k), \\ \mathbf{r}_{LB}(k) &\le \mathbf{r}(k) \le \mathbf{r}_{UB}(k), \\ \mathbf{f}_{LB}(k) &\le \mathbf{f}(k) \le \mathbf{f}_{UB}(k), \end{aligned} \qquad (3)$$

where G is time-invariant diagonal matrix of weights reflecting the importance of holding deviations for rank n as small as possible; $\mathbf{z}(k)$ represents the goal trajectory of the system defined by equation (1); t_q is terminal time; $\mathbf{u}_{LB}(k)$ and $\mathbf{u}_{UB}(k)$ vectors of lower and upper boundary for recruitment in rank x_1, respectively; $\mathbf{r}_{LB}(k)$ and $\mathbf{r}_{UB}(k)$ vectors of lower and upper boundary for transitions $\mathbf{r}$ between ranks $\mathbf{x}$, respectively (as well as output of the system from the last rank x_n); and $\mathbf{f}_{LB}(k)$ and $\mathbf{f}_{UB}(k)$ vectors of lower and upper boundary for fluctuations, i. e. wastages from rank x, respectively. Note that all boundaries are time dependent, which increases the complexity of the addressed optimization problem.

Described optimization problem should be augmented by the rule, that the gained strategy should not exercise undesired oscillations [1]. If, for example, the recruitment would oscillate e. g. between 0 and 1000 men/year this would mean, that one should adapt the recruitment facilities accordingly, which would not be desired. In order to get the proper strategies, not exercising the oscillations, the six state automaton A is defined which identifies the strategies with undesired oscillations in flows between state variables, where the set of states is $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$, the comparison alphabet $A = \{g, e, l\}$, the initial state is $i = S_0$ and the set of end states is $T = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$. The transition function of A, $\delta : S \times A \to S$ is defined by the table.

Six state automation transition table

	g	l	e
$\leftrightarrow S_0$	S_1	S_2	S_0
$\leftarrow S_1$	S_1	S_3	S_1
$\leftarrow S_2$	S_4	S_2	S_2
$\leftarrow S_3$	S_5	S_3	S_3
$\leftarrow S_4$	S_4	S_5	S_4
$\leftarrow S_5$	S_5	S_5	S_5

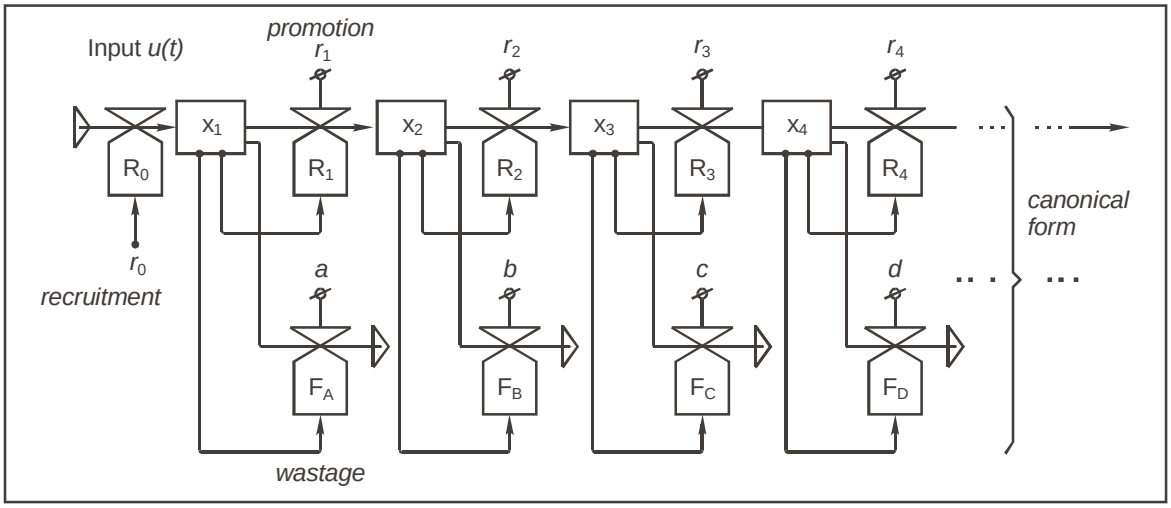


Fig. 1. Structure of the System Dynamics model of manpower system

```
function automaton(r) {

var t = 1; // starting value for t is set to 1
    for (var i=0; i<r.length; i++) { // loop goes from 0 to string length

        if (t==1) { // at the starting case t=1
            if (r[i+1] < r[i]) { // the value in the next step is lower than at present; going down
                t = 2;
            }
            if (r[i+1] > r[i]) { // the value in the next step is higher than at present; going up
                t = 4;
            }
        }
        if (t == 2) { // if t=2, it means, that in the previous step we went down
            if (r[i+1] > r[i]) { // and at the next step, we went up
                t=3;
            }
        }

       if (t == 3 && r[i+1] < r[i]){//we went once down and once up and at the next step again down
          t = 0;
                break; // forbidden combination i.e. oscillation in the control strategy
            }

        if (t == 4) { // we went up in the previous step

        if (r[i+1] < r[i]) { // and go down in the next step
        t=5;
        }
        }

        if (t == 5) { // if value is first up and then down
        if (r[i+1] > r[i]) { // and if we go up again at the next step
        t=0; // we get forbidden combination
        break;
        }
        }

if from the beginning of the loop till the end no condition is fulfilled t does not change;
meaning r[i+1] = r[i]

    }

if (t==0) {
t=10; // we set return value as 10, which is the multiplication factor
}
else {t=1;} // if there were no forbidden moves, the value of the return multiplication factor is 1
return t;
}
```

Fig. 2. Finite automata code realized in JavaScript

The described automaton in table *A* is defined by the following code in JavaScript, which is shown in fig. 2. All the possible states are checked by the set of conditional clauses. Description in the code provides the explanation of particular parts.

Realization of the system is shown in the fig. 3 [11]. The system consists of the GA part as well as of simulation part. Initially, the reading of the values from the Graphical User Interface (GUI) is performed. The system main loop is started, following the conversion of decimal values to binary values since the algorithm works on the converted binary numbers. This is needed, since the parameters are from continuous number set. In the next step the computation of the Fitness Function (FF) is performed. The input vector for the simulation model is prepared and simulation is started for the prescribed number of simulation time steps. At each new simulation run the model is reset. After simulation stop time is reached, the results are either evaluated with FA in order to punish the oscillations or not, which is also one of the options. After the simulation is performed, the minimum and maximum in the population is determined. The fitness vector is then normalized in order to use it at the roulette wheel selection for the new population generation. The crossing of the genomes follows with the elitism selection in order to transfer the best solution to the next population. After the new matrix is formed the mutation is done. In the next step the output of the results is provided. The Main Loop then continues until the final number of steps in the optimization procedure is achieved. In the next step the elapsed time is printed out as well as results and corresponding graphs.

Fig. 4 shows example of the results comparing the desired trajectory and achieved solution for three ranks. The optimization was run with the population of size 10, mutation rate 0.01 with applied FA for 250 timesteps. The optimization time was 206s. The time could be significantly improved by the decreasing the size of the population, for example the run with the population size 3 would take 35s providing similar results however, the convergence of the optimization should also be considered.

Since the mobile devices are limited in the processing power, we have investigated the influence of the population size to the convergence of the optimization procedure. We have applied three different sizes of population, 2, 5 and 10 and perform four optimization runs for each. Fig. 5 shows the average value of the fitness function for different population size. Value 0 would mean 0 deviation from the desired values. One can observe, that the population of size 5 or 10 provides approximately the same convergence however, the population of size 3 converges rather slowly.

Nevertheles, the average time of the optimization is significantly different; for Population of size 3 the optimization time is 36s, for Population of size 5, 116s and Population of size 10 228s. Therefore the smaller population size might lead to acceptable solutions quicker however, too small population would converge rather slowly.

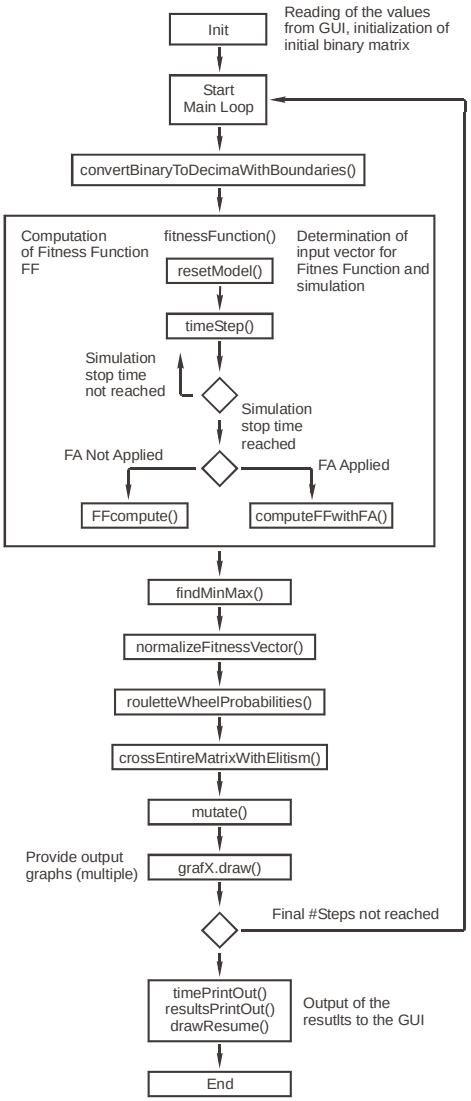


Fig. 3. GA with included SD simulation model and optional FA for elimination of oscillatory solutions

Realization of the optimization system. The prototype realization of the SD manpower transition model with GA as well as finite automaton was done in JavaScript. The speed of the solution search depends on the mobile device applied which is satisfactory for the smaller problems. Important aspect here is, that the model with the optimization could easily be accessed and applied in the cloud. Fig. 6 shows actual screenshot of the realization of the Genetic Algorithm with Finite Automaton in JavaScritpt running on the mobile phone. One could observe the call of the code from the server meaning, that the same code could be distributed and used on any mobile device running JavaScript. This includes all modern mobile phones as well as other smart devices such as Smart TVs etc. This is convenient for the easy application of the system for the determination of manpower strategies with various simulation models [12–15] not only from the field of manpower management. There are also other benefits, for example possibility of development of parallel algorithm on embedded devices with the node.js technology [16]. Since the mobile devices are limited in processing power, the code could also be run on the server which would significantly improve the time performance of the system.

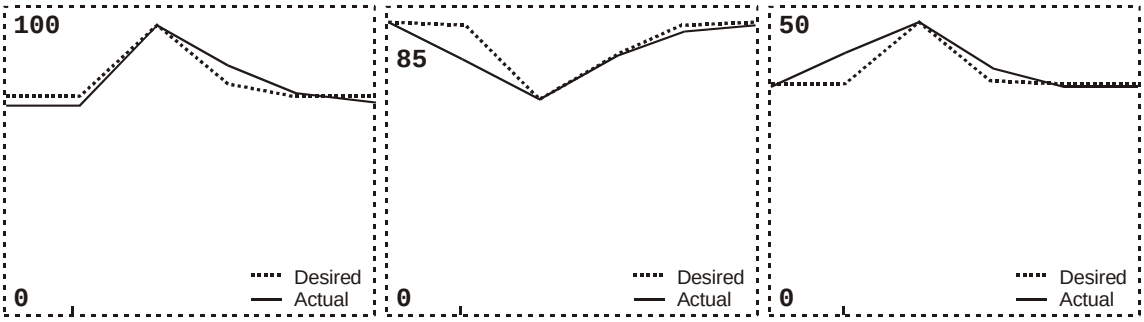


Fig. 4. Example of the results comparing the desired trajectory and achieved solution

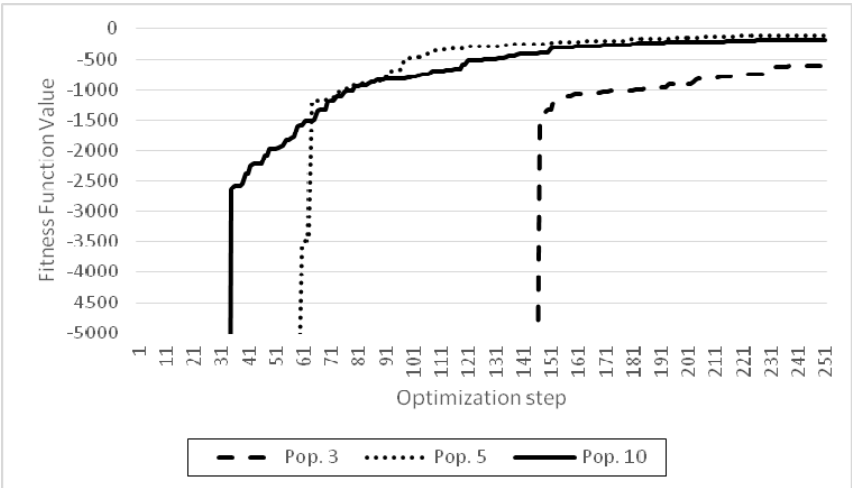


Fig. 5. Results of the experiment with different population sizes (10 – left, 3 – right)

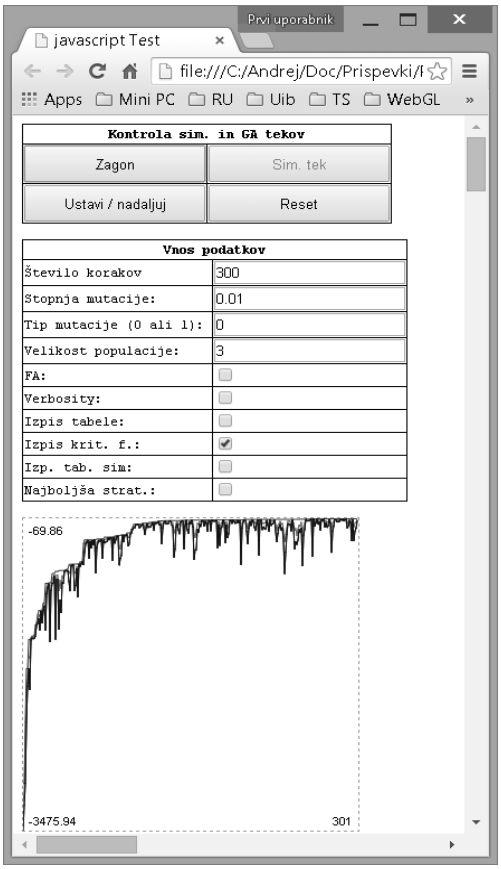


Fig. 6. Realisation of the Genetic Algorithm with Finite Automaton
in JavaScritpt running in the browser

Conclusion. Application of the prescribed trajectory function provided the reduction of the optimization problem of searching for the proper strategy in hierarchical manpower system. Here we assumed the exponential approach to the desired states. The addition of the described finite automaton was efficient at the elimination of strategies that examined oscillations. The implementation of the model as well as genetic algorithm with finite automata was successfully performed in JavaScript providing several benefits at the implementation, especially possibility to easily run the same code on the server, in parallel or on the embedded devices. Performed experiments show that careful selection of the population size might lead to better time performance of optimization.

Directions of the future research include an automation of the optimization procedure adjustment through the genetic algorithm self-configuration [17; 18] or the use of the swarm optimization cooperative method [19] as well as the automated identification of the dynamic system from the description of their state [20].

References

1. Škraba A., Kljajić M., Papler P., Kofjač D., Obed M. Determination of recruitment and transition strategies. *Kybernetes*. 2011, vol. 40, no. 9/10, p. 1503–1522.

2. Mehlman A. An approach to optimal recruitment and transition strategies for manpower systems using dynamic programming. *Journal of Operational Research Society*, 1980, vol. 31, no. 11, p. 1009–1015.

3. Semenkin E., Semenkina M. Stochastic Models and Optimization Algorithms for Decision Support in Spacecraft Control Systems Preliminary Design. Informatics in Control, Automation and Robotics, *Lecture Notes in Electrical Engineering.* 2014, vol. 283, p 51–65, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

4. Akhmedova S., Semenkin E. Co-operation of biology related algorithms. 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2013, p. 2207–2214.

5. Bavec B. Web Realization of Genetic Algorithms for Determination of Control Strategies on Hierarchical Manpower Model. Master Thesis. 2013.

6. Reeves G. R., Reid R. C. A. military reserve manpower planning model. *Computers & Operations Research.* 1999, vol. 26, p. 1231–1242.

7. Škraba A., Koložvari A., Kofjač D., Stojanović R. (2014) Prototype of speech controlled cloud based wheelchair platform for disabled persons. IEEE Embedded Computing (MECO), 2014 3rd Mediterranean Conference on. DOI: 10.1109/MECO.2014.6862683.

8. Node.js. Available at: http://nodejs.org/ (Accesed: 7.11.2014).

9. Rozman Č., Pažek K., Kljajić M., Bavec M., Turk J., Bavec F., Kofjač D., Škraba A. The dynamic simulation of organic farming development scenarios–A case study in Slovenia. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013, vol. 96, p. 163–172.

10. Škraba A., Kljajić M., Kljajić M. B. The role of information feedback in the management group decision-making process applying system dynamics models. *Group Decision and Negotiation.* 2007, vol.16, no. 1, p. 77–95.

11. Škraba A., Kljajić M., Leskovar R. Group exploration of system dynamics models – is there a place for a feedback loop in the decision process? *System Dynamics Review.* 2003, vol. 19, no. 3, p. 243–263.

12. Kljajić M., Bernik I., Škraba A. Simulation approach to decision assessment in enterprises. Simulation. 2000, vol. 75, no. 4, p. 199–210.

13. Giles K. 2006. Where have all the soldiers gone? Russia's military plans versus demographic reality. CSRC, ISBN 1-905058-92-6.

14. Kilaz I., Onder A., Yanik M. Manpower Planning and Management in Cyber Defense. Proceedings of the 13th European Conference on Cyber warefare and Security: ECCWS 2014. Eds.: Liaropoulos A., Tsihrintzis G. Academic Conferences Limited.

15. Armenia S., Centra A., Cesarotti V., De Angelis A., Retrosi C. Military Workforce Dynamics and Planning in the Italian AirForce. *Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, July 22–26, 2012, St. Gallen, Switzerland.

16. Škulj D., Vehovar V., Štamfelj D. The modelling of manpower by Markov chains – a case study of the Slovenian armed forces. *Informatica*. 2008, vol. 32, no. 3, p. 289–291.

17. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic programming algorithm with modified uniform crossover. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (CEC 2012). 2012. P. 6256587.

18. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator. *Lecture Notes in Computer Science.* LNCS 7331. Part 1. 2012, p. 414–421.

19. Akhmedova S., Semenkin E. Co-operation of biology related algorithms. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (CEC 2013). 2013, p. 2207–2214.

20. Ryzhikov I., Semenkin E. Evolutionary strategies algorithm based approaches for the linear dynamic system identification. *Lecture Notes in Computer Science.* 2013, vol. 7824 LNCS, p. 477–484.

© Škraba A., Kofjač D., Žnidaršič A., Rozman Č., Maletič M., 2015

Раздел
Part
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

УДК 621.314.1:001.891.573

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 160–165

БИФУРКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕМКОСТИ ВЫХОДНОГО ФИЛЬТРА

В. И. Апасов[1*], С. Г. Михальченко[2]

[1]АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634041, г. Томск, просп. Кирова, 56в
[2]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Российская Федерация, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 74
[*]E-mail: vovaap@mail.ru

Важное место в различных областях техносферы занимают импульсные преобразователи, которые являются ключевыми элементами большинства промышленных, энергетических и транспортных установок и устройств. По этой причине их эффективность функционирования связана с эксплуатационными, энергетическими, надежностными характеристиками преобразователей, резервы для повышения эффективности которых закладываются на стадии проектирования. В связи с этим все большую роль приобретает концепция нелинейной динамики, применение которой позволяет в полной мере реализовать все конструктивные возможности преобразователей.

Предметом исследования является комбинированный преобразователь со стабилизацией выходного напряжения. Цель данной работы – определение минимального и максимального значений емкости выходного фильтра преобразователя, при которых выходное напряжение преобразователя будет находиться в одноцикловом режиме. Предложена модель комбинированного преобразователя на основе численно-аналитического метода математического моделирования динамики полупроводниковых преобразователей, способного работать в качестве как понижающего, так и повышающего. Данный преобразователь обеспечивает одинаковую полярность входного и выходного напряжения, с возможностью получения выходного напряжения как больше входного, так и меньше, при меньших потерях на элементах и номиналов токов через транзисторы и диоды, в сравнении с импульсными преобразователями с разделительным конденсатором. Математическая модель дает возможность провести исследование, изучить его нелинейные динамические свойства, позволяет провести бифуркационный анализ, а также аналитически произвести поиск длительности управляющих импульсов коммутационных элементов, при которых работа преобразователя будет находиться в устойчивом режиме. Построены бифуркационные диаграммы выходного напряжения в зависимости от изменения емкости выходного фильтра, определен диапазон работы преобразователя в одноцикловом режиме, а также моменты перехода к многоцикловым режимам работы преобразователя. Определен диапазон изменения емкости выходного фильтра, обеспечивающей устойчивую работу преобразователя в различных режимах. Полученные данные могут быть использованы при проектировании устройств силовой электроники на основе преобразователя данного типа, в частности, при проектировании модулей систем электропитания космических аппаратов, для обеспечения их устойчивой работы с учетом постепенной деградации компонентов схемы.

Ключевые слова: математическое моделирование, комбинированный преобразователь, нелинейная динамика, бифуркационный анализ.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 160–165

BIFURCATION ANALYSIS OF THE COMBINED CONVERTER AT CHANGE OF CAPACITY OF THE OUTPUT FILTER

V. I. Apasov[1*], S. G. Mikhalchenko[2]

[1]SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
[2]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
74, Vershinina Str., Tomsk, 634045, Russian Federation
[*]E-mail: vovaap@mail.ru

The important place in various areas of a technosphere is occupied with pulse converters which are basic of the majority of industrial, power and transport installations and devices. For this reason their efficiency functioning is connected with operational, power, reliability characteristics of converters, reserves for which increase of efficiency are put on a design stage. In this connection the increasing role is got by the concept of the nonlinear dynamics which application allows us to realise all constructive possibilities of converter.

The object of the research is the combined converter with stabilisation of output voltage. The purpose of the given work is to *define the minimum and maximum value of capacity of the output filter of the converter at which output voltage of the converter will be in an one-cyclic mode. The model of the combined converter on the basis of a numerically-analytical method of mathematical modeling of dynamics of the semi-conductor converters, capable to work as buck converter, as boost converter is offered. The given converter provides identical polarity of entrance and output voltage, with possibility of reception of output voltage both more entrance, and it is less, at smaller losses on elements and face values of currents through transistor and diodes, in comparison with pulse converters with the dividing condenser. The mathematical model gives the chance to conduct the research, to study its nonlinear dynamic properties, allows to spend bifurcation analysis, and also analytically to prospect duration of operating impulses of switching elements at which converter work will be in a steady mode. Bifurcation diagrammes of output voltage depending on change of capacity of the output filter are constructed, the range of work of the converter in an one-cyclic mode, and also the transition moments to multicyclic operating modes of the converter is defined. The range of change of capacity of the output filter providing steady work of the converter in various modes is defined. The obtained data can be used at designing of devices of power electronics on the basis of the converter of the given type, in particular at designing of modules of systems of power supplies of space vehicles, for maintenance of their steady work taking into account gradual degradation of components of the scheme.*

Keywords: the mathematical modeling, the combined converter, nonlinear dynamics, bifurcation analysis.

Введение. Система электропитания космического аппарата представляет собой совокупность первичных и вторичных источников, электронных и электротехнических устройств, предназначенных для обеспечения бортовых потребителей электрической энергией заданного качества в штатных режимах [1]. Рассматриваемый комбинированный понижающе-повышающий преобразователь служит для построения силового модуля данной системы. Особенность его – получение выходного напряжения как ниже, так и выше напряжения входного источника [2; 3].

Важным аспектом создания любого устройства является его моделирование для дальнейшего исследования поведения в различных режимах работы [4]. Динамика замкнутых систем регулирования ключевого типа, к которым относится данный преобразователь, описывается нелинейными уравнениями кусочно-непрерывного типа для последующего применения бифуркационного подхода в анализе динамических режимов [5; 6]. Бифуркационный анализ позволяет определить теоретические границы изменения параметров системы (будь то индуктивность дросселя, коэффициент обратной связи, частота коммутации [7] и т. п.), при которых она будет находиться в устойчивом состоянии и при внешнем воздействии не изменит свои выходные параметры. В данном случае в качестве рассматриваемого параметра выбрана емкость выходного фильтра, которая может изменяться под влиянием внешних факторов.

На схеме замещения преобразователя (рис. 1) приняты следующие обозначения: $U_{\text{вх}}$ – входной источник ЭДС; $R_{\text{вх}}$ – сопротивление входного источника; К1, К2 – силовые коммутационные элементы; $VD1$, $VD2$ – силовые диоды; R_L – сопротивление обмоток дросселя; L – индуктивность дросселя; C – емкость выходного фильтра; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки; K_U – коэффициент передачи звена обратной связи; $U_{\text{у}}$ – управляющее напряжение; α – коэффициент усиления пропорционального звена; $U_{\text{р}1}(t)$, $U_{\text{р}2}(t)$ – развертывающее напряжение (пилообразное), формируемое генераторами ГРН1, ГРН2; $\xi_1(U_C, t)$, $\xi_2(U_C, t)$ – коммутационные функции для управления ключами.

Математическая модель преобразователя представляет собой систему дифференциальных уравнений, построенных в базисе коммутационно-разрывных функций [8], с переменными матрицами состояний **A** и **B** для каждого из возможных состояний схемы, зависящими от коммутационных функций $K_F(\xi)$:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}(K_F(\xi))\mathbf{X} + \mathbf{B}(K_F(\xi)), \qquad (1)$$

где **X** – вектор переменных состояний.

В свою очередь, $\mathbf{X} = \{i_L, U_C\}$, где i_L – ток в дросселе; U_C – напряжение на выходном конденсаторе.

Данная математическая модель была рассмотрена ранее в [7; 9], где показана ее применимость для решения задач по поиску m-цикловых режимов работы преобразователя и описан алгоритм работы системы управления такой схемы. Управляющие импульсы напряжения K_F для каждого из ключей К1, К2 формируются блоком импульсного модулятора по закону, представленному на рис. 2:

$$K_F(\xi) = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{sign}(\xi)\right], \qquad (2)$$

где функции обратной связи $\xi_i(\mathbf{X}, t)$, $i = 1, 2$, служащие аргументом коммутационных функций $K_{F1}(\xi_1)$ и $K_{F2}(\xi_2)$ для соответствующего ключа, строятся как разность сигнала ошибки и развертывающего напряжения:

$$\xi_i(U_C, t) = \alpha(U_{\text{у}} - \beta U_C) - U_{\text{р}i}(t), \ i = 1, 2. \qquad (3)$$

Развертывающее напряжение каждой зоны формируется по закону

$$U_{\text{р}i}(t) = U_{\text{р}m}\left(\frac{t}{\tau} - E_1\left(\frac{t}{\tau}\right)\right) + U_{0i}, \ i = 1, 2, \qquad (4)$$

где $U_{\text{р}m}$ – амплитудное значение развертывающего напряжения; τ – период квантования ШИМ; E_1 – целочисленная функция Антье; U_{0i} – отклонение развертывающего напряжения каждой зоны.

В системе управления применена многозонная модуляция для управления ключами К1, К2 с условием, что ключ повышающего преобразователя может переходить в замкнутое состояние только при условии, что ключ понижающего преобразователя находится

в замкнутом состоянии [10], а также учитывая, что коммутационные функции принимают единичное значение только в начале тактового интервала (рис. 2).

При моделировании принято, что преобразователь работает в режиме непрерывных токов и коммутационные функции формируются для обоих элементов К1 и К2, состояние же диодов *VD*1, *VD*2 противофазно коммутационным функциям соответствующих ключей.

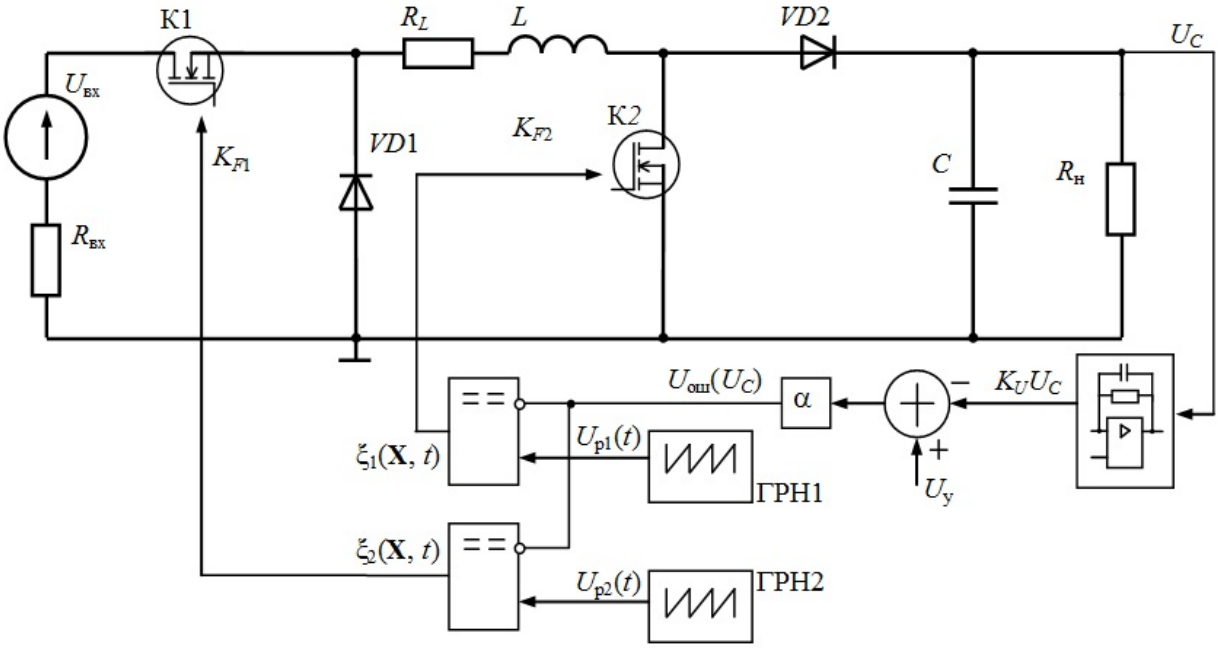


Рис. 1. Схема замещения понижающе-повышающего преобразователя со стабилизацией выходного напряжения

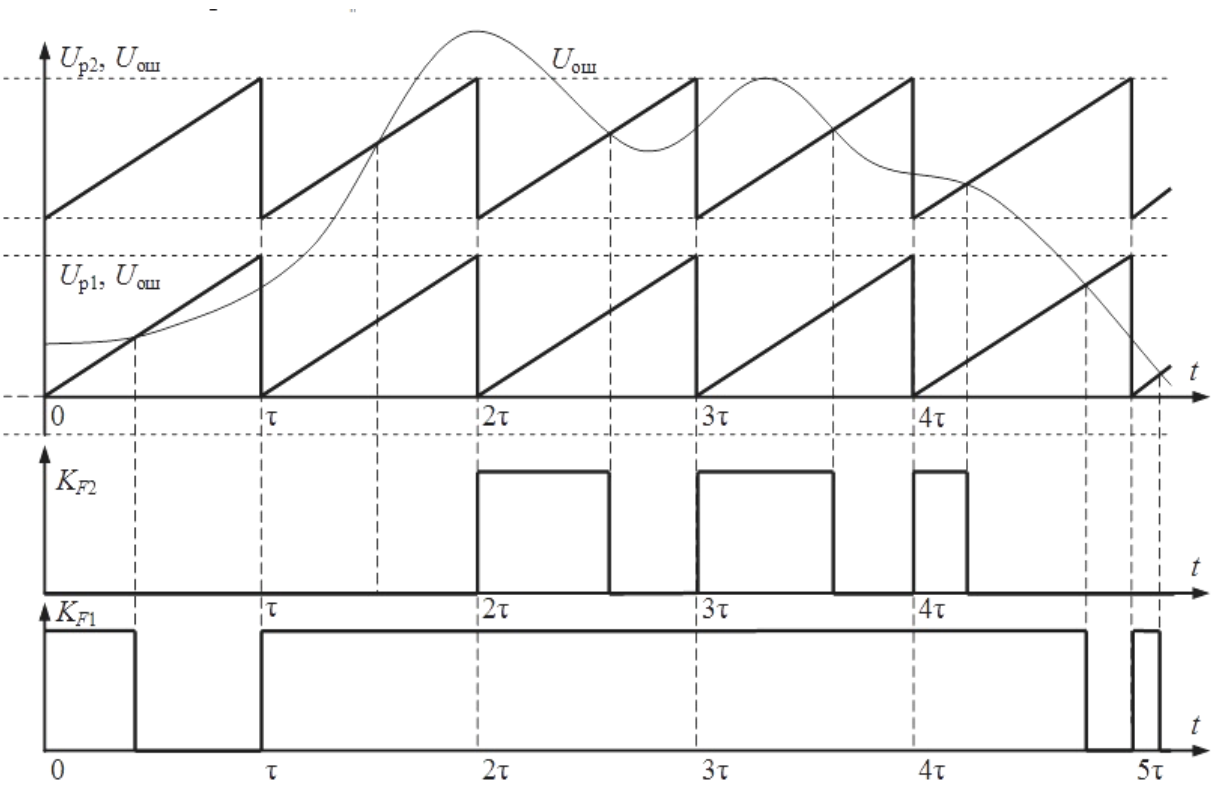


Рис. 2. Формирование коммутационных функций ключей К1, К2

Состояние ключей К1, К2 в зависимости от коммутационных функций $\xi_i(\mathbf{X}, t)$, $i = 1, 2$, определяется *принципами формирования импульсной последовательности* (см. таблицу):

1. Если функция обратной связи для ключа К1 положительная (сигнал ошибки выше функции соответствующего развертывающего напряжения), т. е. $\xi_1(\mathbf{X}, t) \geq 0$, и функция обратной связи ключа К2 также больше нуля, $\xi_2(\mathbf{X}, t) \geq 0$, то состояние коммутационных функций $K_{F1} = 0$; $K_{F2} = 0$.

2. Если функция обратной связи первого ключа меньше нуля, $\xi_1(\mathbf{X}, t) < 0$, а функция обратной связи второго ключа больше нуля, $\xi_2(\mathbf{X}, t) \geq 0$, то состояние функций $K_{F1} = 1$, $K_{F2} = 0$.

3. Если функция обратной связи для второго ключа становится меньше нуля, $\xi_2(\mathbf{X}, t) < 0$ (при функции обратной связи для первого ключа тоже меньше нуля, $\xi_1(\mathbf{X}, t) < 0$), то состояние функций $K_{F1} = 1$, $K_{F2} = 1$.

Матрицы состояний А и В для различных состояний ключей

Состояние ключей	Матрица **A**	Матрица **B**
$K_{F1} = 0$; $K_{F2} = 0$	$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{-(R_L + R_{вх})}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{R_н C} \end{bmatrix}$	$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{U_{вх}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$
$K_{F1} = 1$; $K_{F2} = 0$	$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{R_н C} \end{bmatrix}$	$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
$K_{F1} = 1$; $K_{F2} = 1$	$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \frac{-(R_L + R_{вх})}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_н C} \end{bmatrix}$	$\mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} \frac{U_{вх}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$

Решение общей задачи поиска **X** ввиду кусочной линейности матриц **A** и **B** может быть найдено аналитически – интегрированием системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) на участках линейности [11; 12]. Это решение на каждом интервале линейности при начальных условиях $\mathbf{X}((k-1)\tau) = \mathbf{X}_{k-1}$, где k – номер тактового периода ШИМ, может быть записано в виде

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}(t-(k-1)\tau)}(\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}) - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}, \qquad (5)$$

где $\mathbf{e}^{\mathbf{A}(t-(k-1)\tau)}$ – экспоненциальная матрица.

Вычислительные эксперименты проводились в программном пакете MathLab R2012 с возможностью математического программирования. Для этого с использованием полученной математической модели была написана специальная программа. При проведении вычислительных экспериментов приняты следующие параметры модели: $R_{вх} = 0{,}1$ Ом; $L = 1$ мГн; $R_L = 10$ мОм; $U_{оп} = 6{,}3$ В; $U_{рm} = 1{,}5$ В; $\alpha = 1{,}5$; $f = 50$ кГц. Параметры $U_{вх}$, $R_{вх}$ и C являются варьируемыми величинами. В результате исследований получены бифуркационные диаграммы выходного напряжения преобразователя с активной нагрузкой (рис. 3–6).

Переход выходного напряжения из одноциклового режима в десятицикловый без изменения входных параметров и элементов схемы (рис. 7) свидетельствует о возможности перехода преобразователя в неустойчивое рабочее состояние под влиянием внешнего воздействия [13]. Поиск устойчивых стационарных режимов следует искать из аналитического решения уравнений (2)–(5) [14; 15].

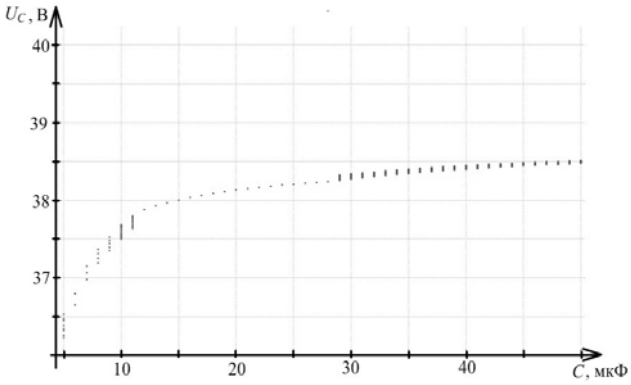


Рис. 3. Бифуркация напряжения на конденсаторе комбинированного преобразователя в зависимости от емкости выходного фильтра в режиме понижения ($U_{вх} = 60$ В)

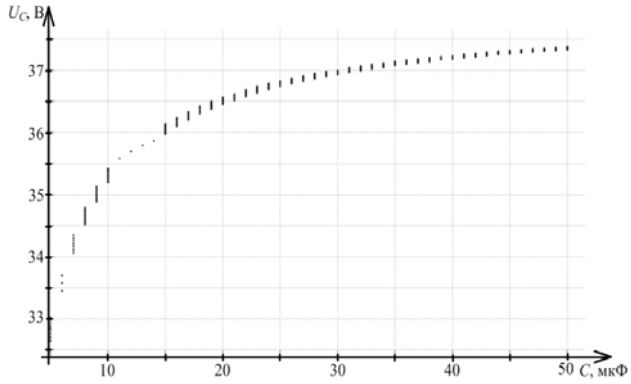


Рис. 4. Бифуркация напряжения на конденсаторе комбинированного преобразователя в зависимости от емкости выходного фильтра в режиме повышения ($U_{вх} = 30$ В)

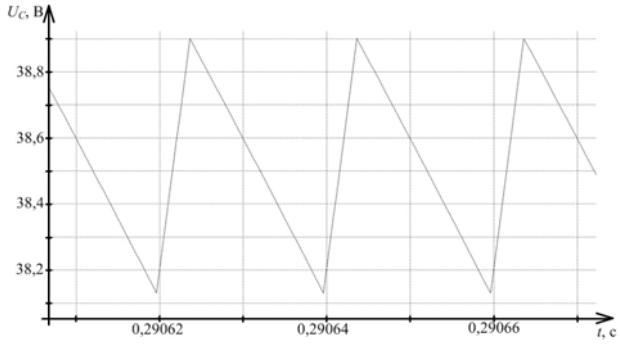


Рис. 5. Напряжение на выходном фильтре, одноцикловый режим

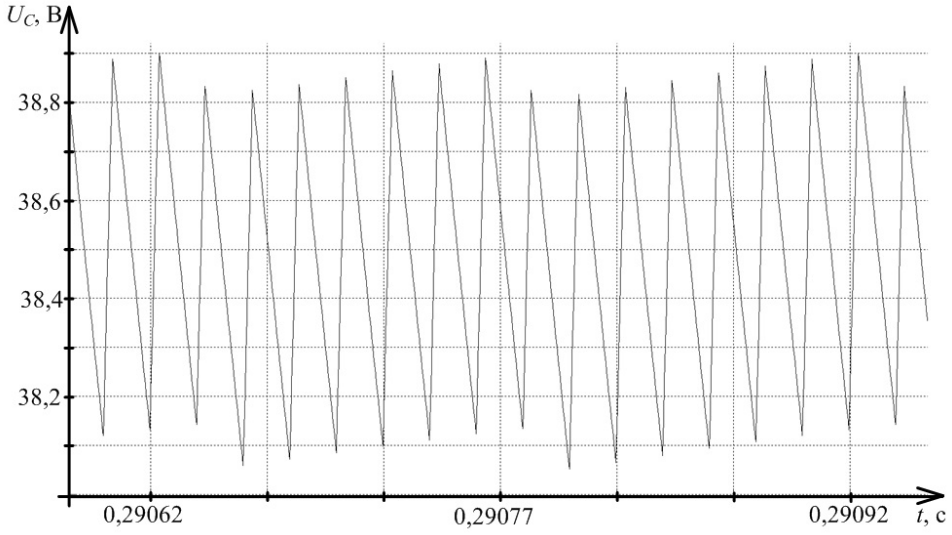


Рис. 6. Напряжение на выходном фильтре, пятнадцатицикловый режим

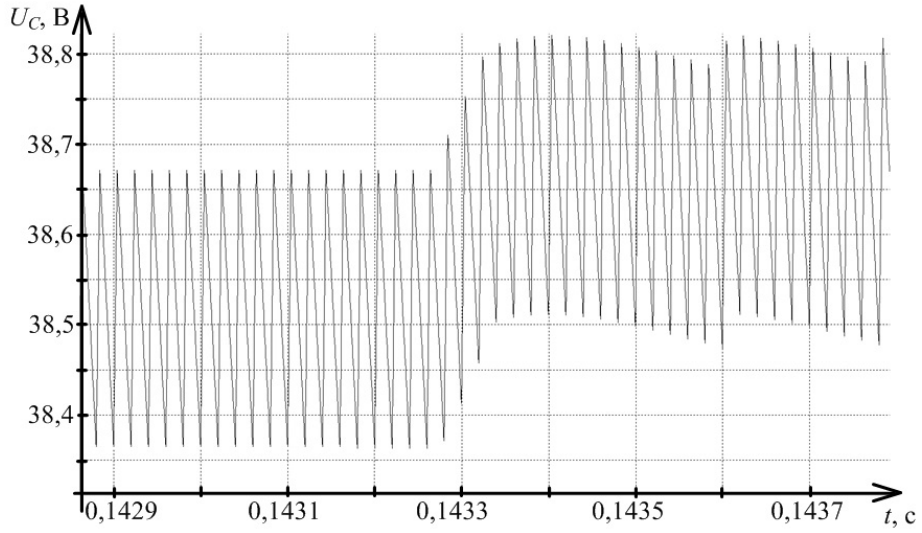


Рис. 7. Напряжение на выходном фильтре, момент перехода из одноциклового режима в десятицикловый

Таким образом, в состоянии повышения комбинированный преобразователь работает в одноцикловом режиме при изменении емкости выходного фильтра от 10 до 15 мкФ. В состоянии понижения он имеет одноцикловый режим работы при изменении емкости фильтра от 12 до 28 мкФ.

Заключение. Исследование показывает, что при проектировании импульсного преобразователя необходимо проводить глубокий анализ влияния изменения внутренних параметров на его выходные характеристики. Также показано, что с помощью предложенной математической модели возможно проведение анализа комбинированного преобразователя со стабилизацией выходного напряжения при исследовании устойчивости его работы. Так, для комбинированного преобразователя с параметрами, приведенными выше, следует выбирать емкость выходного фильтра в диапазоне от 12 до 15 мкФ с целью обеспечения его работы в устойчивом режиме.

Библиографические ссылки

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма, 1994. 318 с.

2. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2006. 632 с.

3. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. 664 с.

4. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. М. : Энергоатомиздат, 1986. 376 с.

5. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1992. № 8. С. 59–68.

6. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т., Михальченко С. Г. Стохастичность в динамике стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1996. № 3. С. 69–75.

7. Апасов В. И. Выбор частоты коммутации широтно-импульсной модуляции системы управления понижающе-повышающего преобразователя напряжения // Научная сессия ТУСУР-2014 : материалы докладов. 2014. С. 161–164.

8. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / А. В. Кобзев [и др.]. Томск : Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. 224 с.

9. Апасов В. И., Михальченко С. Г., Коцубинский В. П. Математическое моделирование комбинированного преобразователя напряжения со стабилизацией выходного напряжения // Докл. ТУСУР. 2013. № 4(30). С. 96–102.

10. Кобзев А. В., Михальченко Г. Я., Музыченко Н. М. Модуляционные источники питания РЭА. Томск : Радио и связь, 1990. 336 с. ISBN 5-253-00515-4.

11. Михальченко С. Г. Автоматизация анализа и синтез импульсных преобразователей энергии с двухполярной реверсивной модуляцией : дис. … канд. техн. наук. Брянск, 2001. 200 с.

12. Эрроусмит Д., Плейс Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями : пер. с англ. М. : Мир, 1986. 243 с.

13. Теория автоматического управления. Ч. 1, 2. Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А. А. Воронова. М. : Высш. шк., 1986.

14. Оценка нелинейных динамических свойств полупроводниковых преобразователей с дозированием энергии по коэффициентам пульсаций тока и напряжения / К. В. Бородин [и др.]. // Научный вестник НГТУ. 2012. № 2(47). С. 79–90.

15. Михальченко С. Г. Функционирование импульсно-модуляционных преобразователей в зонах мультистабильности // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1(25), ч. 1. С. 259–268.

References

1. Souctin B. P. et al. *Systemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Systems of power supplies of space vehicles]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, 318 p.

2. Meleshin V. I. *Tranzistornaya preobrazovatelnaya tekhnika* [The transistor converting mechanics]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2006, 632 p.

3. Zinovyev G. S. *Osnovy silovoy electroniki: uchebnoe posobie* [Bases of power electronics: the manual]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2003, 664 p.

4. Moin V. S. *Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli* [The stabilised transistor converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 376 p.

5. Baushev V. S. [About not determined modes of functioning of a voltage stabilizer with pulse-width regulation]. Moscow, *Electrichestvo*. 1992, vol. 8, p. 59–68 (In Russ.).

6. Baushev V. S., Gusubaliev G. T., Mihalchenko S. G. [Stochasticity in dynamics of a voltage stabilizer with pulse-width regulation]. Moscow, *Electrichestvo*. 1996, vol. 3, p. 69–75 (In Russ.).

7. Apasov V. I. [Choice of frequency of switching of pulse-width modulation of a control system of the buck-boost converter of voltage] *Nauchnaya sessiya TUSUR*. 2014, vol. 3, p. 161–164 (In Russ.).

8. Kobzev A. V., Mihalchenko G. Y., Andriyanov A. I., Mihalchenko S. G. *Nelineynaya dinamika poluprovodnikovykh preobrazovateley* [Nonlinear dynamics of semiconductor converters]. Tomsk, Tomsk state university of control systems and radioelectronics Publ., 2007, 224 p.

9. Apasov V. I., Mihalchenko S. G., Kotsubinsky V. P. [Matematical modeling of the combined converter of pressure with stabilisation of output voltage]. *Sbornik TUSUR*. 2013, vol. 30, no. 4, p. 96–102 (In Russ.).

10. Kobzev A. V., Mihalchenko G. Y., Muzychenko N. M. *Modulatsionnye istochniki pitaniya REA* [Modulation power supplies REA]. Tomsk, Radio i svyaz' Publ., 1990, 150 p.

11. Mihalchenko S. G. *Avtomatizatsiya analiza i sintez impulsnykh preobrazovateley energii s dvukhpolyarnoy reversivnoy modulactsiey. Dis. kand. tekhn. nauk* [Automation of the analysis and synthesis of pulse converters of energy with two-polar reversive modulation. The diss. of Cand. Tech. Sci]. Bryansk, 2001, 200 p.

12. Errousmith D. *Obyknovennye differentsialnye uravneniya. Kachestvennaya teoriya s prilogeniyami* [Ordinary differential the equations. The qualitative theory with appendices]. Moscow, Mir Publ., 1986, 243 p.

13. Voronov A. A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [The automatic control theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986.

14. Borodin K. V., Mihalchenko G. Y., Mihalchenko S. G., Obrusnik V. P. [Estimation of nonlinear dynamic properties of semi-conductor converters with energy dispensing on factors of pulsations of a current and voltage]. *Nauchnuy vestnik NGTU*. 2012, vol. 47, no. 2, p. 79–90 (In Russ.).

15. Mihalchenko S. G. [Functioning of impulsive and modulation converters in multistability zones]. *Sbornik TUSUR*. 2012, vol. 25, no. 1, p. 259–268 (In Russ.).

© Апасов В. И., Михальченко С. Г., 2015

УДК 629.7.054

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 166–171

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН НА БАЗЕ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПЕЧАТНОЙ ОБМОТКОЙ НА ДИСКОВОМ СТАТОРЕ ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Т. Н. Баландина*, Е. А. Баландин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: error.balandina@yandex.ru

С появлением космических летательных аппаратов, предназначенных для длительного функционирования в космическом пространстве и требующих постоянной ориентации, стали применяться электромеханические исполнительные органы на базе двигателей-маховиков. Это объясняется тем, что суммарная масса управляющего устройства и эквивалентная масса (в соответствии с потребной мощностью) источника энергоснабжения (например, солнечных батарей) в данном случае не зависят от продолжительности работы электромеханического органа на базе двигателя-маховика.

В то же время аналогичная характеристика систем управления с реактивными двигателями увеличивается с ростом продолжительности ориентировочного полета. Кроме того, при этом возрастает потребное количество включений реактивных двигателей, что приводит к снижению надежности системы. Поэтому для космических летательных аппаратов, требующих длительной ориентации, применение систем с двигателями-маховиками оказывается более рациональным.

Создание нового электромеханического исполнительного органа на базе управляемого по скорости двигателя-маховика для системы ориентации космического аппарата с улучшенными массогабаритными характеристиками позволит экономить потребителям деньги при запуске космических аппаратов. Требование минимальной массы является одним из главных предъявляемых к электромеханическим исполнительным органам. Целью исследования является расчет параметров и разработка конструкции электромеханического исполнительного органа на базе бесконтактного двигателя постоянного тока с улучшенными массогабаритными характеристиками. Это достигается за счет применения плоского статора, выполненного в виде печатного монтажа, при длине статора цилиндрической формы десятки миллиметров сокращаются до 1,5–2 мм, что влечет уменьшение размеров силовой части корпуса исполнительного органа, а соответственно, и массы всего двигателя-маховика.

Предметом исследования является комплекс эксплуатационных характеристик управляемого по скорости двигателя-маховика, обеспечиваемых в процессе разработки двигателя-маховика на базе бесконтактного двигателя постоянного тока с печатной обмоткой на дисковом статоре.

Результатом выполненной работы является разработанная конструкция двигателя-маховика на базе бесконтактного двигателя постоянного тока с печатной обмоткой на дисковом статоре.

Ключевые слова: электромеханический исполнительный орган, управляемый по скорости двигатель-маховик, космический аппарат, бесконтактный двигатель постоянного тока с печатной обмоткой, кинетический момент, момент управления.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 166–171

AN ELECTROMECHANICAL EXECUTIVE BODY BASED ON THE CONTACTLESS DIRECT CURRENT MOTOR WITH A WINDING PRINTING DISK STATOR FOR SMALL SPACECRAFTS

T. N. Balandina*, E. A. Balandin

JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: error.balandina@yandex.ru

With the advent of spacecraft designed for long-term operation in space and required constant orientation electromechanical executive bodies on the basis of engine - flywheel began to be applied. It’s happened because total mass of the control device and the equivalent mass (according to the needs power) source of energy (for example solar

battery) in this case do not depend on operating period of the electromechanical executive body on the basis of reaction flywheel.

At the same time, similar characteristics of control systems with reaction motors increases with the duration of the orientation of the flight. Furthermore, the required amount of inclusions reaction motors that reduces the deterioration of system reliability increases. Therefore, for spacecraft requiring prolonged orientation, application systems with engine-flywheels is more rational.

Creating a new electromechanical executive body on the basis of the engine speed managed flywheel system for spacecraft orientation with improved weight and size, will save consumers money when launching spacecraft. The requirement of minimum weight is one of the main imposed on electromechanical executive bodies. The aim of research is to calculate the parameters and develop a design of electromechanical executive body based contactless direct current (DC) motor with improved weight and size characteristics. This is achieved by using a slim stator configured as a printed installation, with the length of the stator cylindrical shape reduced to tens of millimeters of 1,5–2 mm, which involves reducing the size of the power of the valve body, and thus the weight of the entire engine-flywheel.

The subject of the research is complex operating characteristics managed by the engine speed – the flywheel provides in the development of the engine−flywheel based on contactless DC motor printed winding on a disk stator.

The result of this work is the design of the engine flywheel based on contactless DC motor printed winding on a disk stator.

Keywords: Electromechanical executive body, controlled by the engine speed - the flywheel, spacecraft, contactless DC motor printed winding, the angular momentum, moment of control.

Введение. В настоящее время широкое применение имеют электромеханические исполнительные органы (ЭМИО) на базе двигателей-маховиков. Данный вид ЭМИО обладает меньшей массой и отсутствием динамической ошибки при стабилизации углового положения космического аппарата, чем исполнительные органы (ИО) на базе реактивных двигателей, и более простой конструкцией по отношению к ИО, использующим гиростабилизаторы.

Двигатели-маховики являются инерционными ИО, так как они не требуют отброса массы и управляющие моменты связаны с проявлением инерционных свойств перемещаемых, а точнее, вращающихся тел (маховиков) [1–3].

В настоящее время в ЭМИО космических аппаратов наибольшее применение находят бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ). Отсутствие щеточно-коллекторного узла у данного вида двигателя увеличивает надежность и долговечность, повышает коэффициент полезного действия. Такой вид электродвигателя может работать в условиях широкого диапазона температур, в вакууме [4].

Объект исследования. Научно-технической новизной данной конструкции является то, что данный тип электродвигателя, по анализу доступных публикаций, не имеет аналогов применения в космической области.

В данной статье рассматривается конструкция ЭМИО на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой (ПО) на статоре, мощностью 5 Вт и напряжением питания 12 В, кинетическим моментом 0,3 Н·м·с, угловой скоростью 628 рад/с. Применение плоского статора с печатной обмоткой для ЭМИО является оригинальным новшеством.

Конструкция ЭМИО на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на статоре вместе с блоком управления приведена на рис. 1.

Ротор *2* включает в себя кольцевой магнитопровод из магнитно-мягкого материала, в пазах которого установлены литые постоянные магниты квадратной формы. Крепление постоянных магнитов в пазах магнитопровода осуществляется приклеиванием. Поверхности магнитопровода *3* и самих полюсов, образующие торцевой воздушный зазор, тщательно обработаны для обеспечения одинаковых величин зазора магнитной индукции под каждым полюсом. Магнитная система встраивается в основание *5* и диафрагму маховика *15* из немагнитного материала. Через отверстие в основании *5* и корпуса *12* подводятся провода питания (от разъема *28*) к трехфазному статору *1*, блоку управления *4* и датчикам положения *25*, установленным на пластине *16*. Статор *1* приклеивается к корпусу *12* и поджимается пластиной *16* при помощи винтов (на рисунке не показано). Блок управления *4* крепится к основанию *5* при помощи шпилек *24*. Вся конструкция ЭМИО закрывается верхним *14* и нижним *13* кожухами. Отверстия в кожухах и корпусе заливаются клеем. Для установки ИО на борту малого космического аппарата используются ножки корпуса.

Технической особенностью данного электродвигателя является плоская форма его конструкции за счет применения дискового статора с печатной обмоткой (рис. 2).

Статор бесконтактного двигателя постоянного тока с печатной обмоткой (рис. 3) представляет собой тонкий диск из механически прочного и нагревостойкого изоляционного материала.

На обеих сторонах диска напечатаны плоские тонкие медные проводники обмотки. Радиальные участки *1* проводников (рис. 3) образуют активную зону обмотки. Изогнутые по эвольвенте части *2* проводников вблизи кромки и центра дискового статора необходимы для соединения активных проводников *1* и называются лобовыми частями обмотки. Лобовые части, напечатанные на противоположных сторонах диска, соединяются между собой через гальванизированные отверстия *3* (гальванические заклепки). На внутреннем диаметре гальванизированные переходы *3* часто располагаются в два ряда в шахматном порядке [5–7].

Ниже приведен расчет основных параметров статора с печатной обмоткой и маховика и размеры печатной обмотки дискового статора (рис. 4), где $D_{ср}$ – оптимальный средний диаметр статора.

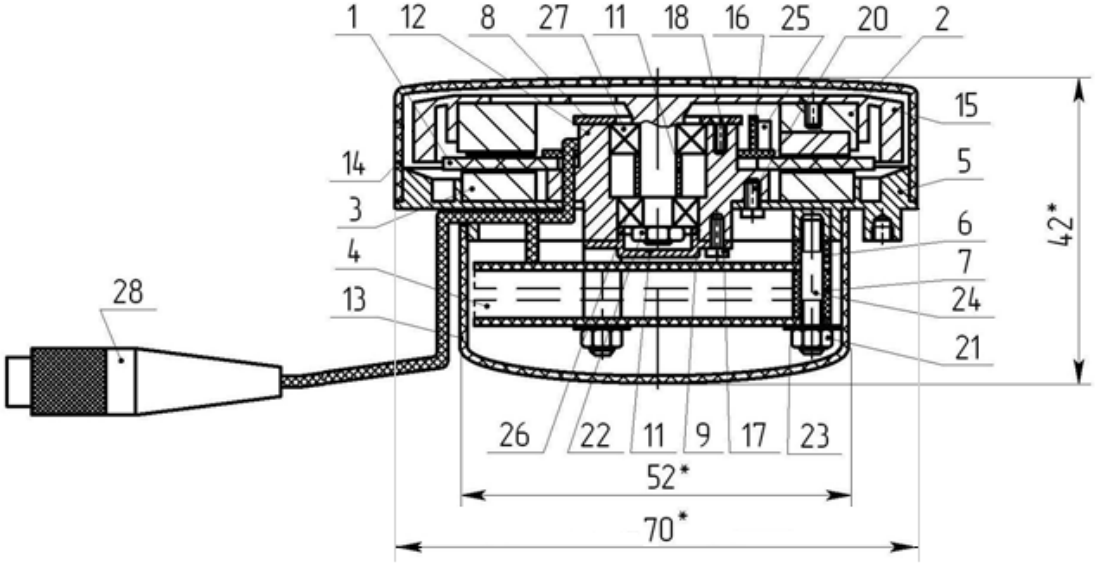


Рис. 1. Конструкция ЭМИО на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на статоре, с блоком управления и его габариты

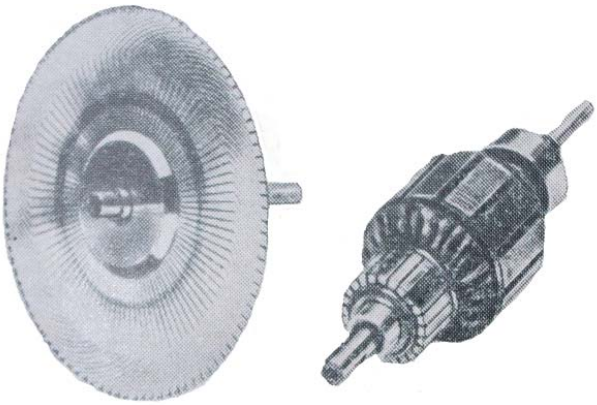
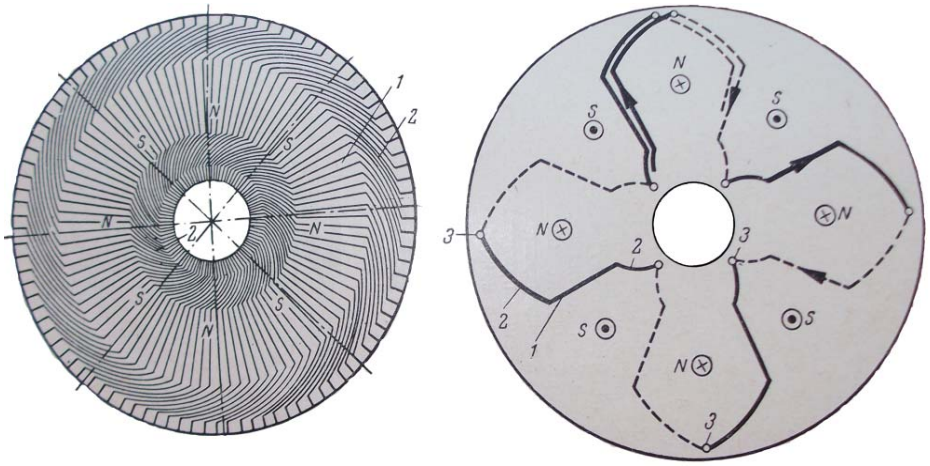


Рис. 2. Печатный дисковый якорь (слева) и якорь обычного исполнения (справа) двигателей постоянного тока одинаковой мощности



а *б*

Рис. 3. Схема восьмиполюсной волновой печатной обмотки дискового статора: *а* – обмотка на диске статора; *б* – схема соединения печатных проводников на обеих сторонах диска статора

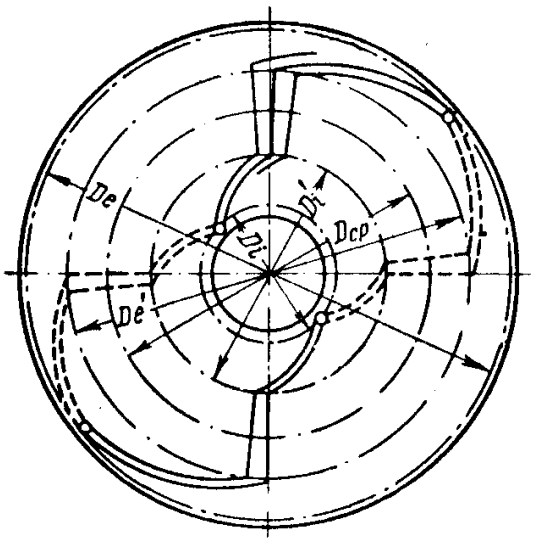


Рис. 4. Размеры печатной обмотки дискового статора

Внутренний диаметр обмотки [7]: $D_i = \dfrac{N \cdot t_я}{2 \cdot \pi \cdot \gamma} =$

$= \dfrac{57 \cdot 0,074}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,77} = 0,87$ см $= 8,7$ мм, где $t_я$ = 0,074 см = = 0,74 мм – минимальный шаг печатной обмотки; $\gamma = 0,77$ – отношение минимального шага печатной обмотки $t_я$ к минимальному шагу на внутреннем диаметре t_i; $N = 57$ – число проводников печатной обмотки.

Внешний диаметр обмотки [7]: $D_e = D_e^{'} + \dfrac{\pi \cdot \gamma \cdot D_i}{2 \cdot p} =$

$= 3,9 + \dfrac{3,14 \cdot 0,77 \cdot 1,9}{2 \cdot 3} = 4,7$ см $= 47$ мм, где $D_e^{'}$ = 3,9 см = = 39 мм – внутренний диаметр внешних лобовых частей (рис. 4). Но исходя из рациональной комплектации всего ЭМИО, приняты следующие значения диаметров обмотки (с сохранением пропорций): внутренний диаметр обмотки 30 мм, внешний 58 мм.

Для данной магнитной системы выбраны неодимовые магниты марки № 35 [8].

Допустимая магнитная индукция магнитов: $B_c = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Тл.

Коэрцитивная сила: H_c = 9550 А/см = 955 А/мм.

Воздушный зазор: $\delta = 0,24$ см $= 2,4$ мм.

Выражение ширины полюса [7]: $b_m = \dfrac{\sigma \cdot B_{ср}}{B_c} \cdot \tau =$

$= \dfrac{1,5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-4}} \cdot 1,9 = 0,8$ см $= 8$ мм, где σ – коэффициент рассеяния; $B_{ср} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл – средняя индукция в воздушном зазоре [7].

Длина полюса [7]: l_m = 0,33 · $D_{ср}$ = 0,33 · 3,6 = = 1,2 см = 12 мм.

Высота полюса [7]:

$$h_m = \frac{B_r \cdot \delta}{H_c \cdot B_{ср} \cdot \mu_0 \cdot \alpha_\delta} =$$

$$= \frac{1,45 \cdot 10^{-4} \cdot 0,24}{9550 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,26 \cdot 10^{-9} \cdot 0,9} =$$

$$0,3 \text{ см} = 3 \text{ мм}.$$

Момент инерции маховой массы и ротора *2* [9]: $J = \dfrac{H}{\Omega} = \dfrac{0,3}{628} = 0,00047$ кг·м^2. Момент инерции ротора составляет 0,00023 кг·м^2, тогда момент инерции обода маховика равен 0,00024 кг·м^2. Так как размеры маховика выбираются таким образом, чтобы фактический момент инерции был равен или несколько больше требуемого момента инерции, то для дальнейших расчетов принимаем значение момента инерции равное 0,0003 кг·м^2.

Используя выражение момента инерции маховой массы [4] $J = \dfrac{\pi \cdot \gamma \cdot h}{2} \cdot \left(R^4 - r^4\right)$, где h = 8 мм = = 0,008 м – высота обода; $\gamma = 77500$ Н / м^3 – удельная масса материала (сталь марки 14Х17Н2) [10]; $R = 34$ мм $= 0,034$ м – наружный радиус маховика; r – внутренний радиус маховика, м, определим внутренний радиус обода маховика [11]:

$$r = \sqrt[4]{R^4 - \frac{2 \cdot J}{\pi \cdot h \cdot \gamma}} =$$

$$= \sqrt[4]{0,034^4 - \frac{2 \cdot 0,0003}{3,14 \cdot 0,008 \cdot 7500}} =$$

$$= 0,03 \text{ м} = 30 \text{ мм}.$$

Основываясь на результатах расчетов основных параметров двигателя-маховика была построена 3D-модель конструкции ЭМИО с помощью программы T-flex CAD 14 ЗАО «Топ Системы» (г. Москва) [12]. Масса 3D-модели обода маховика равна 0,043 кг, масса 3D-модели ротора – 0,055 кг, суммарная масса 3D-моделей ротора и обода маховика составляет 0,098 кг.

Разработанный ЭМИО предназначен для пространственной ориентации и стабилизации положения малого космического аппарата (рис. 5).

Основными компонентами разработанной конструкции исполнительного органа являются: двигатель-маховик, датчики положения ротора, блок управления.

Разработанный исполнительный орган генерирует переменный кинетический момент $H = \pm 0,3\ \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$.

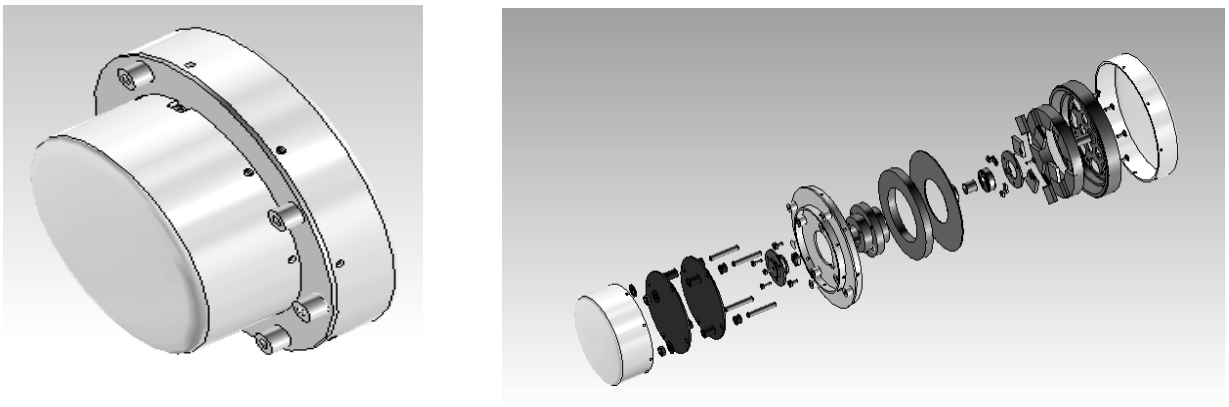
Двигатель-маховик включает в себя:

1. БДПТ с печатной обмоткой на дисковом статоре, вращающий маховик с переменной угловой скоростью $\Omega = \pm 6000$ об/мин.

2. Маховик, представляющий собой массивный ротор с явно выраженным ободом.

3. Датчики положения ротора, реализованные на датчиках Холла MLX90217 [13].

В таблице приведены основные технические характеристики разработанного ЭМИО с дисковым статором и двух ЭМИО с цилиндрическим статором: производства ОАО «НПЦ «Полюс» (г. Томск) [14] и «СПУТНИКС» (ООО «Спутниковые инновационные космические системы», г. Сколково) [15].



а *б*

Рис. 5. 3D-модель исполнительного органа:
а – в собранном виде; *б* – в разобранном виде

Технические характеристики разработанного ЭМИО, МДМ-0,5 и SX-WH-25

Технические параметры	ЭМИО с ПО	МДМ-0,5 (ОАО «НПЦ «Полюс»)	SX-WH-25 «Спутникс»
Кинетический момент, Н·м·с	0,3	0,5	0,25
Максимальный управляющий момент, Н·м	0,013	0,015	0,0215
Энергопотребление (ном./макс.), Вт	0,64/5	2/15	2,3/23
Ресурс, лет	20	17	–
Масса УДМ/БА, кг	0,21/0,11	1,2/0,4	0,3
Габаритные размеры, мм	УДМ = 70×21; БА = 52×19	–	84×86×71

Заключение. За счет применения плоского статора, выполненного в виде печатного монтажа, при длине статора цилиндрической формы десятки миллиметров сокращаются до 1,5–2 мм, что влечет уменьшение размеров силовой части корпуса исполнительного органа, а соответственно, и массы всего двигателя-маховика.

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что разработанная конструкция электромеханического исполнительного органа на базе бесконтактного электродвигателя постоянного тока с печатной обмоткой на дисковом статоре при меньшем значении управляющего момента по отношению к рассмотренным ЭМИО имеет следующие преимущества:

1) меньшее энергопотребление;
2) больший ресурс (по сравнению МДМ-0,5);
3) меньшую массу (по сравнению МДМ-0,5);
4) меньшие габариты.

Библиографические ссылки

1. Алексеев К. Б. Управление космическими летательными аппаратами. М. : Машиностроение, 1974. 343 с.
2. Чеботарев В. Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2005. 168 с.
3. Звездин И. А. Малые космические аппараты: перспективы рынка [Электронный ресурс]. URL: http://www.telenir.net/transport_i_aviacija/vzlyot_2005_01/p75.php. (дата обращения: 28.10.2013).
4. Гладышев Г. Н. Системы управления космическими аппаратами : учеб. пособие. Томск : ТПУ, 2000. 207 с.
5. Белянин Л. Н. Конструирование печатного узла и печатной платы. Расчет надежности : учеб.-метод. пособие. Томск : ТПУ, 2008. 80 с.

6. Лунд П. Прецизионные печатные платы: конструирование и производство : пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1983. 360 с.

7. Казанский В. М. Малоинерционные электродвигатели постоянного тока с печатной обмоткой на якоре. М. : Энергия, 1965. 96 с.

8. Неодимовые магниты: свойства и характеристики [Электронный ресурс]. URL: http://magnetline.ru/articles/neodimovye-magnity.-svoystva-i-harakteristiki..html (дата обращения: 13.03.2014).

9. Дмитриев В. С. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов : учеб. пособие. Ч. 1. Томск : ТПУ, 2013. 208 с.

10. ГОСТ 5949–75. Сталь сортовая и калиброванная коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1977. 23 с.

11. Бритова Ю. А. Исследование вибрационных характеристик электродвигателей-маховиков систем ориентации космических аппаратов. Томск : ТПУ, 2012. 139 с.

12. Комплекс программных продуктов для автоматизации проектирования [Электронный ресурс]. URL: http://www.tflex.ru (дата обращения: 08.09.2013).

13. Melexis. MLX90217 Documentation [Электронный ресурс]. URL: http://www.melexis.com/Position-Speed-Sensors/Speed-Sensors/MLX90217-3.aspx (дата обращения: 13.02.2014).

14. ОАО «НПЦ «Полюс» [Электронный ресурс]. URL: http://polus.tomsknet.ru/?id=211(дата обращения: 13.11.2014).

15. Спутникс [Электронный ресурс]. URL: http://www.sputnix.ru/ru/products/microsatellites-systems/acs-actuators/item/251-adc-wheels/sx_wheels_rus.pdf (дата обращения: 13.11.2014).

References

1. Alekseev K. B. *Upravlenie kosmicheskimi letatel'nymi apparatami* [Control of space aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Pabl., 1974, 343 p.

2. Chebotarev V. E. *Proektirovanie kosmicheskikh apparatov sistem informatsionnogo obespecheniya. Kn. 2: Vnutrennee proektirovanie kosmicheskogo apparata* [Designing spacecraft information support systems: Vol. 2. The internal design of the spacecraft]. Krasnoyarsk, Sib. St. Aerospace. Univ Publ, 2005, 168 p.

3. Zvezdin I. A. *Malye kosmicheskie apparaty: perspektivy rynka* [Small spacecraft: market prospects]. Available at:http://www.telenir.net/transport_i_aviacija/vzlyot_2005_01/p75.php. (accessed 28.10.2013).

4. Gladyshev G. N. *Sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami* [System control of spacecraft]. Tomsk, TPU Publ., 2000, 207 p.

5. Belyanin L. N. *Konstruirovanie pechatnogo uzla i pechatnoy platy. Raschet nadezhnosti* [Designing of printed module and printed circuit card. Calculation of reliability]. Tomsk, TPU Publ., 2008, 80 p.

6. Lund P. *Pretsizionnye pechatnye platy: Konstruirovanie i proizvodstvo* [Precision printed circuit card: Design and Production]. Transl. from Eng. Moscow, Energoatom Publ, 1983, 360 p.

7. Kazanskiy V. M. *Maloinertsionnye elektrodvigateli postoyannogo toka s pechatnoy obmotkoy na yakore* [low−inertia direct−current motors with print winding on rotor]. Moscow, Energiya Publ., 1965, 96 p.

8. *Neodimovye magnity svoystva i kharakteristiki* [Neodymium magnets are the properties and characteristics]. Available at: http://magnetline.ru/articles/neodimovye-magnity.-svoystva-i-harakteristiki.html (accessed: 13.03.2014).

9. Dmitriev V. S. *Elektromekhanicheskie ispolnitel'nye organy sistem orientatsii kosmicheskikh apparatov* [Electromechanical executive bodies of systems orientation of spacecraft]. Part 1. Tomsk, TPU Publ., 2013, 208 p.

10. *GOST 5949–75. Stal' sortovaya i kalibrovannaya korrozionnostoykaya, zharostoykaya i zharoprochnaya. Tekhnicheskie usloviya.* [State Standard 5949-75. Sorted and gauged corrosion-resistant, heat-resistant and high-temperature steel. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1977, 23 p.

11. Britova Y. A. *Issledovanie vibratsionnykh kharakteristik elektrodvigateley–makhovikov sistem orientatsii kosmicheskikh apparatov* [The study of vibration characteristics of motor flywheel systems orientation of spacecraft]. Tomsk, TPU Publ., 2012, 139 p.

12. *Kompleks programmnykh produktov dlya avtomatizatsii proektirovaniya* [Complex software for design automation]. Available at: http://www.tflex.ru (accessed: 08.09.2013).

13. Melexis. MLX90217 Documentation. Available at: http://www.melexis.com/Position-Speed-Sensors/Speed-Sensors/MLX90217-3.aspx (accessed: 13.02.2014).

14. OAO “NPTs Polyus” [Corporation “RPC Pole”]. Available at: http://polus.tomsknet.ru/?id=211 (accessed: 13.11.2014).

15. *Sputniks* [Sputniks]. Available at: http://www.sputnix.ru/ru/products/microsatellites-systems/acs-actuators/item/251-adc-wheels/sx_wheels_rus.pdf (accessed: 13.11.2014).

© Баландина Т. Н., Баландин Е. А., 2015

УДК 551.510.535

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 172–176

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS ПРИ АДАПТАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ

А. А. Васенина*, К. А. Сидоренко

ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»
Российская Федерация, 644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231
*E-mail: vas.al.an@rambler.ru

Рассмотрены различные методы непрерывного мониторинга состояния ионосферной плазмы. Показано, что, несмотря на достоинства использующихся подходов, существующие недостатки ограничивают возможности их практического применения. Проведен анализ различных вариантов прогнозирования параметров ионосферы, на основе которого обоснован выбор модели, отвечающей требованиям простоты и высокой скорости расчетов, необходимых для дальнейших исследований. Приведен пример построения профиля электронной концентрации с применением выбранной экспериментальной модели NeQuick. Показана целесообразность использования в качестве адаптирующего параметра модели значений потока солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см, характеризующего уровень солнечной активности. Представлен способ оценки индекса с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS, включающий в себя сглаживание измерений каждого спутника, формирование корреляционных матриц данных и минимизацию функционала, определяющего отклонение модели от истинных значений. Эффективность методов непрерывного мониторинга состояния ионосферной плазмы оценивалась путем проведения экспериментальных работ на полигоне ОАО «ОНИИП», г. Омск. На основе полученных данных показаны основные преимущества предложенного способа при определении критической частоты слоя F2 в точках, удаленных от области видимости спутников на расстояния от 700 до 1300 км: лучшее описание характера зависимости параметра от времени и, как следствие, повышение точности определения.

Ключевые слова: спутниковое радиозондирование ионосферы, полное электронное содержание (ПЭС), ионосферная модель NeQuick.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 172–176

APPLICATION OF SATELLITE SYSTEMS GLONASS/GPS AT ADAPTATION IONOSPHERIC MODEL

A. A. Vasenina*, K. A. Sidorenko

JSC “Omskiy Nauchno Issledovatelskiy Institut Priborostroeniya”
231, Maslennikova Str., Omsk, 644009, Russian Federation
*E-mail: vas.al.an@rambler.ru

The paper discusses different methods of continuous monitoring of the state of the ionospheric plasma. It is shown that, despite the merits of the approach used, the current shortcomings limit their practical application. The analysis of the various options prediction of ionospheric parameters is conducted. It is possible to substantiate the choice of a model that meets the requirements of simplicity and high speed calculations necessary for further research. An example of the construction of electron density profile using the selected experimental model NeQuick is given. Reasonability of using as adapting the model parameters values of the solar radio emission at a wavelength of 10.7 cm, which characterizes the level of solar activity is shown. The way of evaluation index using data from global navigation satellite systems GLONASS/GPS is given. It includes smoothing the measurements for each satellite, the formation of correlation matrices of data and minimizing the functional defined by the deviation from the true values of the model. The effectiveness of the methods of continuous monitoring of the state of the ionospheric plasma was evaluated by carrying out experimental work on the range of "ONIIP" Omsk. On the basis of the obtained data the main advantages of the proposed method are shown. In determining the critical frequency of the F2 layer at points distant from the scope of the satellites in the distance of 700 to 1300 km: the best description of the nature of the parameter depending on the time and, consequently, improving the accuracy of determination is given.

Keywords: satellite radio-sounding of the ionosphere, total electron content (TEC), NeQuick ionospheric model.

Введение. Актуальность задачи по развитию методов непрерывного мониторинга состояния ионосферной плазмы обусловлена существенным влиянием ионосферы на работу радиотехнических систем связи, локации и навигации. Одним из современных подходов к решению этой проблемы является трансионосферное зондирование, связанное с развитием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS [1–3]. Применение моделированных сигналов позволяет измерить запаздывание радиоволн, вызванное плазмой, и рассчитать одну из важнейших характеристик среды – полное электронное содержание (ПЭС). Однако в виду отсутствия глобальной сети ионосферных станций, в частности на территории России, широкое применение получили ионосферные модели. Тем не менее точность этих моделей может быть существенно снижена при отличии входных данных от их реальных значений. Таким образом, цель данной работы заключается в оценке возможности повышения эффективности ионосферных моделей при использовании данных глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

Определение параметров ионосферы. В последнее время широкое распространение получили эмпирические модели ионосферы, требующие небольших вычислительных затрат и ограниченный набор входных параметров. Однако этот класс моделей, как правило, описывает некоторые средние месячные значения (долгосрочный прогноз), а для решения задач оперативного прогноза необходимо проводить адаптацию по результатам текущей диагностики состояния среды. К широко известным и наиболее проработанным эмпирическим моделям можно отнести международную справочную модель ионосферы (International Ionospheric Model) IRI [4; 5] и европейскую ионосферную модель NeQuick [6–8]. Сравнительный анализ этих двух моделей, проведенный в работах [9; 10], показал, что они хорошо воспроизводят максимум электронной концентрации при различных уровнях геомагнитной возмущенности, но хуже отображают электронный профиль ионосферы. При этом точность расчета вертикального ПЭС с использованием NeQuick выше на 10–15 %. Стоит также отметить алгоритмическую простоту этой модели: аппроксимация профиля осуществляется одной функцией (функцией Эпштейна), что позволяет избежать проблем «сшивания» отдельных сегментов. С учетом отмеченных выше преимуществ в настоящей работе при реализации адаптивной ионосферной модели предпочтение отдано в пользу модели NeQuick.

Рассмотрим данную модель более подробно. Семейство моделей NeQuick создано на основе европейской ионосферной модели DGR (DiGiovanni и Radicella, 1990) и представляет собой сумму слоев Эпштейна [4]. При этом построение профиля электронной концентрации $N(h)$ базируется на использовании реперных точек и выполнении условия непрерывности профиля и его первой производной [7–11]. Слой Эпштейна, в свою очередь, задается аналитическим выражением вида

$$N(h)=\frac{4\cdot N_m}{\left(1+\exp\left(\frac{h-h_m}{B}\right)\right)^2}\exp\left(\frac{h-h_m}{B}\right),$$

где N_m – максимум электронной концентрации; h_m – высота максимума электронной концентрации; B – полутолщина слоя. Пример построения профиля отображен на рис. 1.

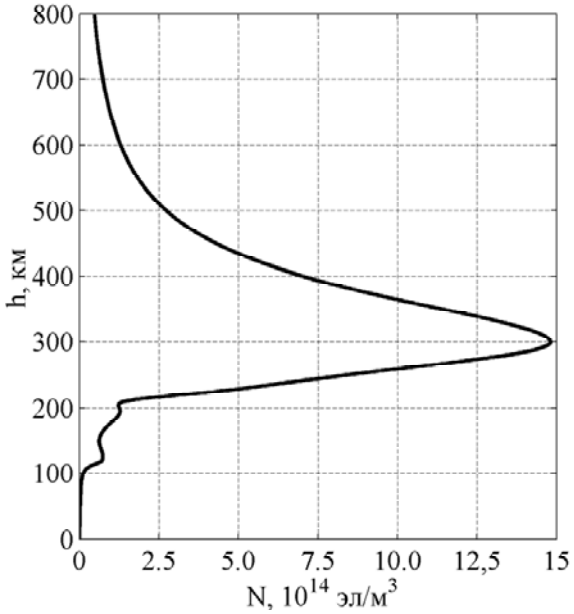


Рис. 1. Профиль электронной концентрации ионосферы

В ходе ранее проведенных исследований [11; 12] было выявлено, что в качестве адаптирующего параметра из индексов солнечной активности целесообразней использовать индекс $F_{10,7}$ – поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см [13; 14]. Значения этого индекса обновляются каждый день и находятся в свободном доступе на сайте http://www.spaceweather.com.

Оценка индекса солнечной активности по данным навигационных приемников. На следующем этапе исследований оценивалась возможность определения индекса солнечной активности по данным навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS. При этом рассчитанный индекс $F_{10,7}$ может быть использован для нахождения параметров ионосферы в любой точке земного шара.

Предложенный алгоритм определения индекса $F_{10,7}$ реализуется следующей последовательностью действий.

Сначала определяется количество доступных спутников, координаты точки пересечения направления на спутник с максимумом слоя F2, затем производится определение ПЭС по формуле [15]:

$$\text{ПЭС}=\text{ПЭС}_{\text{Н}}\cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right)\cos(\beta)\right),$$

где R – радиус Земли; h – высота ионосферы; $\text{ПЭС}_{\text{Н}}$ – наклонное значение ПЭС, определяемое для фазовых (ф) и кодовых измерений (к) по формулам

$$\text{ПЭС}_{\text{НК}}=\frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3\left(f_{L2}^2-f_{L1}^2\right)}\left(p_{L1}-p_{L2}\right)-IFB,$$

$$\text{ПЭС}_{\text{НФ}} = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3\left(f_{L1}^2 - f_{L2}^2\right)}\left(\phi_{L1} - \phi_{L2}\right) - IFB,$$

где f_{L1}, f_{L2} – частоты спутника; p_{L1}, p_{L2} – псевдодальности по коду, измеренные РПУ для каждой частоты; ϕ_{L1}, ϕ_{L2} – псевдодальности, измеренные по количеству циклов фазы; *IFB* – значения смещения ПЭС для каждого спутника.

Следующим шагом является сглаживание полученных значений ПЭС для каждого спутника в *i*-й момент времени по формуле

$$\text{ПЭС}_{\text{Н}}^{i} = w_m^i \text{ПЭС}_{\text{НК}}^{i} + w_n^i \times$$
$$\times\left(\text{ПЭС}_{\text{Н}}^{i-1} + \left(\text{ПЭС}_{\text{НФ}}^{i} - \text{ПЭС}_{\text{НФ}}^{i-1}\right)\right),$$

где w_m, w_n – весовые коэффициенты, связанные соотношением:

$$w_m^i + w_n^i = 1.$$

Используя полученные значения, формируется корреляционная матрица данных:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{K}\mathbf{X}\mathbf{X}^H,$$

где **X** – матрица данных, определяемая по формуле:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \text{ПЭС}_1^1 & \cdots & \text{ПЭС}_1^K \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{ПЭС}_N^1 & \cdots & \text{ПЭС}_N^K \end{pmatrix},$$

где K – максимальное количество временных отчетов; N – количество спутников.

Далее формируется корреляционная матрица значений ПЭС для каждого спутника согласно выбранной модели ионосферы NeQuick с использованием набора значений интенсивности солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см.

Следующим шагом производится определение значения индекса $F_{10,7}$ в области видимости спутника путем минимизации функционала, определяющего отклонение модели от реальных данных, например:

$$z\left(F_{10,7}\right) = \left\|\mathbf{R} - \mathbf{R}_{\text{model}}\left(F_{10,7}\right)\right\|^2,$$

где $\mathbf{R}_{\text{model}}\left(F_{10,7}\right)$ – корреляционная матрица данных значений ПЭС, рассчитанных на основе используемой модели ионосферы. Используя полученное значение $F_{10,7}$ в качестве адаптирующего параметра, можно восстановить профиль электронной концентрации ионосферы в искомых точках.

Описание эксперимента. Эффективность предложенной методики оценивалась путем проведения экспериментальных работ на полигоне ОАО «ОНИИП», г. Омск (55N, 73.4E). Приемная станция состояла из ЭВМ, приемного устройства ProPak_v6 и антенны ГЛОНАСС/GPS. На рис. 2 отмечено местоположение приемной станции GPS/ГЛОНАСС, черными точками обозначены видимые спутники. Для оценки достоверности получаемых параметров проводилось сравнение модельных значений критической частоты слоя F2 (f_kF2) с данными, измеренными вертикальными ионозондами, распложенными в г. Томске (56.5N, 84.9E) и д. Подкаменная Тунгуска (61.6N, 90.0E). При расчете f_kF2 использовались рекомендации сектора радиосвязи Международного союза электросвязи МСЭ-R [16].

На рис. 3 представлены зависимости значения критической частоты слоя F2 от времени суток для способов, использующих значения $F_{10,7}$ и данные ионозонда, и предлагаемого способа для Томска. Расчет велся по данным на 28 октября 2014 г. Из графиков видно различие способа, использующего прогнозируемое значение $F_{10,7}$, от способа, в основе которого лежат данные, полученные с ионозонда (СКО 2,77 МГц (30 %)). Адаптация модели, используя предложенный способ, позволила уменьшить ошибку определения параметров слоя *F*2 с 30 до 16 % (СКО 1,33 МГц).

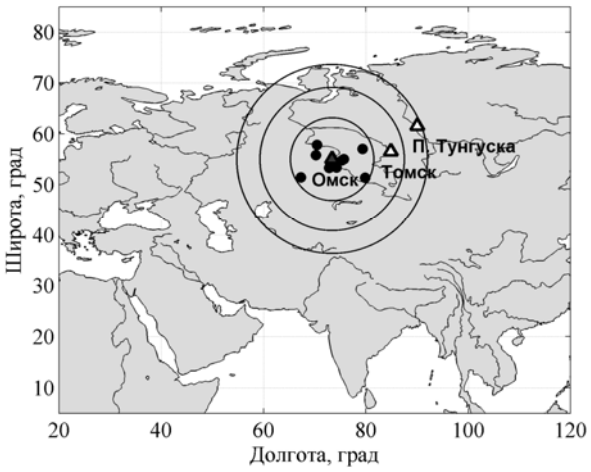


Рис. 2. Схема эксперимента

Также в ходе эксперимента были рассмотрены точки, расположенные на более значительном расстоянии. На рис. 4 представлены зависимости критической частоты слоя F2 от времени суток для способов, использующих значения $F_{10,7}$ и данные ионозонда, и предлагаемого способа для Подкаменной Тунгуски. Из графиков видно повышение точности определения искомого параметра при использовании адаптации выбранной модели по данным навигационных спутников, численно это выразилось в снижении СКО с 64 до 38 % (с 4,7 до 2,59 МГц). Таким образом, в ходе проведенного эксперимента получен выигрыш в точности рассмотренного способа над способом без коррекции значений $F_{10,7}$ при удалении от точки измерений примерно в 1,5–2 раза.

Заключение. В работе рассматривается аналитическая ионосферная модель NeQuick, отличающаяся алгоритмической простотой и высокой эффективностью расчета ПЭС. В качестве адаптирующего параметра из индексов солнечной активности рекомендуется использовать поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см ($F_{10,7}$). Однако, как показали результаты исследований, значения $F_{10,7}$ необходимо предварительно откорректировать по данным текущей диагностики среды.

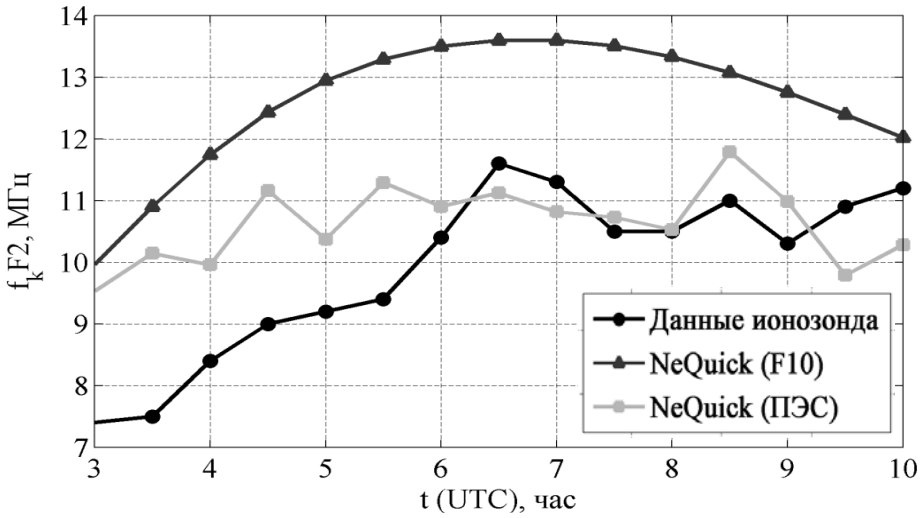


Рис. 3. Зависимости f_kF2 от времени суток для Томска

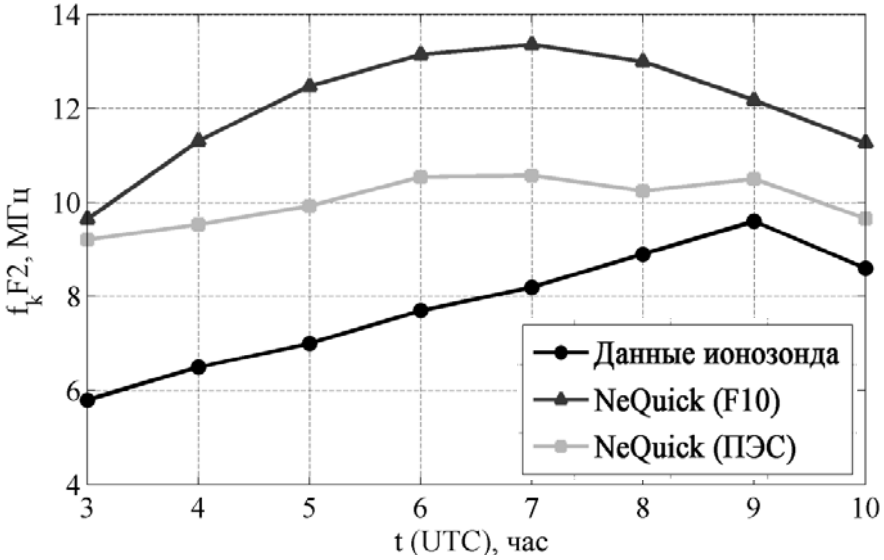


Рис. 4. Зависимости f_kF2 от времени суток для Подкаменной Тунгуски

Предложен способ оценки адаптирующего параметра по данным глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Экспериментальные исследования показали, что данный способ позволяет повысить точность прогнозирования критической частоты слоя F2 даже для точек, находящихся на расстоянии 700–1300 км от места зондирования.

Библиографические ссылки

1. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.

2. Авдюшин С. И. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. М. : ИПГ им. академика Е. К. Федорова, 2008. 210 с.

3. Ground- and space-based GPS data ingestion into the NeQuick model / C. Brunini [et al.] // Journal of Geodesy. 2011. Vol. 85 (12). P. 931–939.

4. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science. 2001. Vol. 36, № 2. P. 261–275.

5. Bilitza D. International reference ionosphere 2000: examples of improvements and new features // Advances in Space Research. 2003. Vol. 31, № 3. P. 757–767.

6. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications // PhD thesis, Delft University of Technology. 2009. 208 pp.

7. Radicella S. M. The NeQuick model genesis, uses and evolution // Annals of Geophysics. 2009. Vol. 52, № 3/4. P. 417–422.

8. Radicella S. M. Ionospheric models for GNSS single frequency range delay corrections // Fisica de la Tierra. 2008. Vol. 20. P. 27–39.

9. Андреева Е. С. Анализ ионосферных параметров по радиозатменным, ионозондовым измерениям и данным моделей IRI, NeQuick // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 8. С. 44–52.

10. Coisson P. Comparisons of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models // Annals of Geophysics. 2002. Vol. 45, № 1. P. 111–116.

11. Васенина А. А. Методика коррекции индексов солнечной активности // Техника радиосвязи / Омский НИИ приборостроения. 2013. 2 (20). С. 27–34.

12. Березовский В. А., Васенина А. А., Бензик А. В. Влияние точности определения критической частоты слоя F2 на поведение лучевых траекторий // Омский научный вестник. 2012. № 3 (113). С. 294–298.

13. Брюнелли Б. Е., Намгладзе А. А. Физика ионосферы. М. : Наука, 1988. 528 с.

14. Блинов И. В. Солнечная активность // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8, № 2. С. 64–68.

15. TEC Measurement By Single Dual-frequency GPS Receiver / Y. Zhang [et al.] // Proceedings of the 2003 International Symposium on GPS/GNSS (November 2003). URL: http://tsgps.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/TEC.pdf. (дата обращения: 02.11.2014).

16. ITU-R Reference Ionospheric Characteristics // Recommendation ITU-R P.1239-2. 2010. 30 p.

References

1. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. *Radiotomografiya ionosfery* [Ionospheric tomography]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 336 p. (In Russ.).

2. Avdyushin S. I. *Radiozondirovanie ionosfery sputnikovymi i nazemnymi ionozondami* [Radiosounding ionospheric satellite and ground ionosonde]. Moscow, IPG im. akademika E. K. Fedorova Publ., 2008, 210 p. (In Russ.).

3. Brunini C., Azpilicueta F., Gende M., Camilion E., Aragon-Angel M., Hernandez-Pajares M., Juan M., Sanz J., Salazar D. Ground- and space-based GPS data ingestion into the NeQuick model. *Journal of Geodesy*, 2011, vol. 85 (12), p. 931–939.

4. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 2001, vol. 36, no 2, p. 261–275.

5. Bilitza D. International reference ionosphere 2000: examples of improvements and new features. *Advances in Space Research*, 2003, vol. 31, no 3, p. 757–767.

6. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. *PhD thesis, Delft University of Technology*, 2009, 208 p.

7. Radicella S. M. The NeQuick model genesis, uses and evolution. *Annals of Geophysics*, 2009, vol. 52, no. 3/4, p. 417–422.

8. Radicella S. M. Ionospheric models for GNSS single frequency range delay corrections. *Fisica de la Tierra*, 2008, vol. 20, p. 27–39.

9. Andreeva E. S. [Analysis of ionospheric parameters by radio occultation, ionozondovym measurements and data models IRI, NeQuick]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy,* 2010, vol. 15, no 8, p. 44–52 (In Russ.).

10. Coisson P. Comparisons of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuickmodels. *Annals of Geophysics,* 2002, vol. 45, no 1, p. 111–116.

11. Vasenina A. A. [Methods of correction of solar activity indices]. *Tekhnika radio svyazi. Omskiy NII priborostroeniya*, 2013, vol. 2(20), p. 27–34 (In Russ.).

12. Berezovskiy V. A., Vasenina A. A., Benzik A. V. [Influence the accuracy of determination of the critical frequency of the F2 layer on the behavior of ray trajectories]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2012, no. 3 (113), p. 294–298 (In Russ.).

13. Bryunelli B. E., Namgladze A. A. *Fizika ionosfery.* [The physics of the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 528 p. (In Russ.).

14. Blinov I. V. [Solar activity]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 2004, vol. 8, no 2, p. 64–68 (In Russ.).

15. Zhang Y., Wu F., Kubo N., Yasuda A. TEC Measurement By Single Dual-frequency GPS Receiver. *Proceedings of the 2003 international Symposium on GPS/GNSS,* November 2003. Available at: http://tsgps.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/TEC.pdf (accessed 02.11.2014).

16. ITU-R Reference Ionospheric Characteristics. *Recommendation ITU-R P. 1239,* 2010, 30 p.

© Васенина А. А., Сидоренко К. А., 2015

УДК 629.7.054

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 177–182

АМОРТИЗАТОР ДЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. А. Васильцов*, А. А. Липовцев

АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
*E-mail: polus@online.tomsk.net

В системах ориентации и стабилизации малогабаритных космических аппаратов широко используются двигатели-маховики. На сегодняшний день актуальна проблема уменьшения вредных возмущающих воздействий на них, вызванных погрешностями изготовления и сборки шарикоподшипниковых опор, неуравновешенностью ротора, электромагнитными силами.

Минимизация отрицательных воздействий отдельных узлов и элементов двигателя-маховика позволит улучшить динамические свойства и срок службы космического аппарата в целом.

Исходя из этого, рассмотрены основные причины возникновения указанных воздействий при работе двигателя-маховика и методы их уменьшения. Проведен краткий обзор существующих типов амортизаторов и принципов их работы. Описаны особенности применения данных устройств для систем ориентации и стабилизации на базе двигателей-маховиков.

Предложена оригинальная конструкция амортизатора для электродвигателя-маховика. Приведено описание его работы. По разработанным чертежам изготовлен образец амортизатора. Составлена методика измерения вибрационных характеристик. Проведены испытания с целью выявления влияния амортизатора на снижение вибрации двигателя, которые заключались в измерении характеристик двигателя-маховика в нормальных климатических условиях на свободном упругом подвесе без внешнего виброзащитного устройства, а также совместно с ним.

Приведены графики сравнения зависимостей виброскорости от частоты вращения ротора-маховика исследуемого двигателя по трем ортогональным осям без амортизатора и совместно с ним. Выявлено, что при установке амортизатора на космический аппарат уровень виброскорости снижается по сравнению с имеющимся на посадочной поверхности двигателя-маховика. Для определения этого снижения рассчитаны амплитудные коэффициенты эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика. Представлены соответствующие графики, из которых видно, что установка амортизатора между двигателем-маховиком и космическим аппаратом уменьшает уровень виброскорости, передаваемой на космический аппарат, до 3,5–4 раз (в среднем вдвое) и, следовательно, уменьшает вредные возмущающие моменты, передаваемые на космический аппарат.

Дано заключение о целесообразности применения разработанного амортизатора.

Ключевые слова: двигатель-маховик, вибрация, амортизатор, виброскорость, космический аппарат, возмущающий момент, неуравновешенность, испытания, график.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 177–182

THE SHOCK-ABSORBER FOR EXECUTIVE POWERS OF SYSTEM OF STABILISATION OF A SPACECRAFT

A. A. Vasiltsov*, A. A. Lipovtsev

SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
*E-mail: polus@online.tomsk.net

Engines-flywheels are widely used in the systems of orientation and stabilization of a small-sized spacecrafts. Today the topical issue is reduction of harmful revolting influences on the engines-flywheels caused by errors of manufacturing and assemblage of ball-bearing support, a rotor-flywheel unbalance, electromagnetic influences.

Minimization of negative mechanical influences of separate knots and engine-flywheel elements will allow to improve dynamic properties and spacecraft service life as a whole.

In presented article principal causes of occurrence of harmful mechanical influences at engine-flywheel work are considered. The methods of their reduction are considered. The short review of existing types of shock-absorbers and principles of their work and described features of application of shock-absorbers for systems of orientation and stabilization on the base of engines-flywheels is regarded.

The construction of the shock-absorber for the electric motor-flywheel is offered. The description of work of the developed shock-absorber is achieved.

Under the developed drawings the development type of the shock-absorber is made. The technique of carrying out of measurement of vibrating characteristics is made.

The conducted tests are consisted of measurement of vibrating characteristics of the engine-flywheel in normal conditions on free elastic pendant without external vibroprotective devices and also together with it.

In the article the graphs of comparison of dependences vibrovelocity from frequency of rotation of a rotor-flywheel of the investigated engine on three orthogonal axes without the shock-absorber and together with it are presented.

It is revealed, that a shock-absorber installation on a spacecraft a level of vibrovelocity decreases in comparison with level of vibrovelocity on a landing surface of the engine-flywheel. For definition of quantity of this amplitude peak coefficients effectiveness ratio of application of the shock-absorber from frequency of rotation of a rotor-flywheel are calculated. Corresponding graphs show that shock-absorber installation between the engine-flywheel and a spacecraft are reduced a level of vibrovelocity, transferred to a space vehicle to 3,5–4 times (on the average in 2 times) and reduces quantity of the harmful revolting moments transferred to a spacecraft.

In conclusion, the detention about application of the developed shock-absorber is given.

Keywords: the engine-flywheel, vibration, the shock-absorber, vibrovelocity, a spacecraft, disturbing moment, an unbalance, testing, the graph.

Введение. Ужесточение требований к вибрационным характеристикам исполнительных органов космических аппаратов (КА), в частности электродвигателей-маховиков (ДМ), обусловливает необходимость введения в их конструкцию дополнительных виброзащитных устройств – амортизаторов, демпферов, способствующих снижению нежелательных вибраций, возникающих как внутри, так и вне прибора [1]. Основным требованием к таким устройствам является снижение вибраций от остаточной неуравновешенности ротора-маховика (даже при тщательном изготовлении его центр масс не совпадает с расчетным геометрическим центром, а ось вращения – с главной осью инерции, что приводит к статическому и динамическому дисбалансу), погрешности геометрической формы шариков, дорожек качения колец шарикоподшипника и прочих источников колебаний. В то же время такие устройства должны обладать высокими жесткостными и малыми массогабаритными характеристиками [2–5].

Типы амортизаторов и требования к ним. Существует достаточно много типов амортизаторов (демпферов). Условно их можно разделить на две группы. Одни из них – пассивные, гасящие колебания за счет своих конструктивных свойств. В этой группе наиболее распространены динамические гасители колебаний, но их установка на КА неизбежно приводит к утяжелению конструкции. Другие – активные, принцип работы которых заключается в создании управляющего момента, компенсирующего возмущающие воздействия [6–8].

Но требования, предъявляемые к исполнительным органам системы ориентации и стабилизации КА, в частности к ДМ, не позволяют воспользоваться существующими типами амортизаторов. Основные причины этого – жесткий допуск (1′–2′) на отклонение главной оси прибора от заданного положения, а также ограничения на массогабаритные характеристики. Помимо указанного, амортизаторы для ДМ имеют недостаточную теплопроводность (для отведения тепла от двигателя на КА) и не обеспечивают гашение колебаний в широком диапазоне частот.

Амортизатор должен обладать упругими свойствами, представленными на рис. 1 упругим элементом *1*, и вязкими свойствами (демпфирующим элементом *2*). Комбинация свойств элементов *1* и *2* дает возможность расширить диапазон демпфирования возмущающих моментов [9–11].

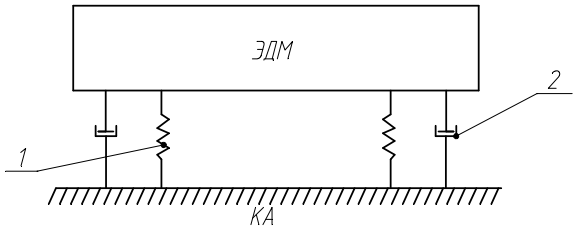


Рис. 1. Структурная схема амортизатора

Описание конструкции разработанного амортизатора. Исходя из вышесказанного, разработан амортизатор (рис. 2), который устанавливается на основание ДМ, а затем эта единая конструкция – на КА. Причем одна из поверхностей амортизатора в точности повторяет установочную поверхность КА, а другая – ДМ, что позволяет не вводить никаких дополнительных изменений в конструкцию двигателя.

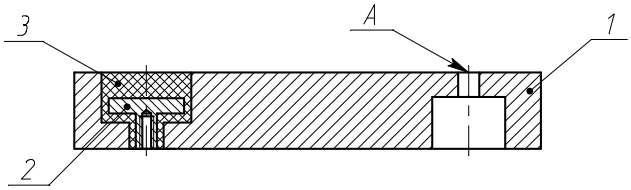


Рис. 2. Конструкция амортизатора

Основу амортизатора составляет кольцо из алюминиево-магниевого сплава *1*, в котором имеются места крепления кольца к ДМ (отверстия А) и места крепления к КА (втулки *2*). Между втулками *2* и кольцом *1* расположены полимерные составы *3* с различными демпфирующими свойствами, что позволяет расширить диапазон рабочих частот [12].

Испытания амортизатора. При проведении испытаний амортизатор устанавливался на ДМ по схеме, приведенной на рис. 3.

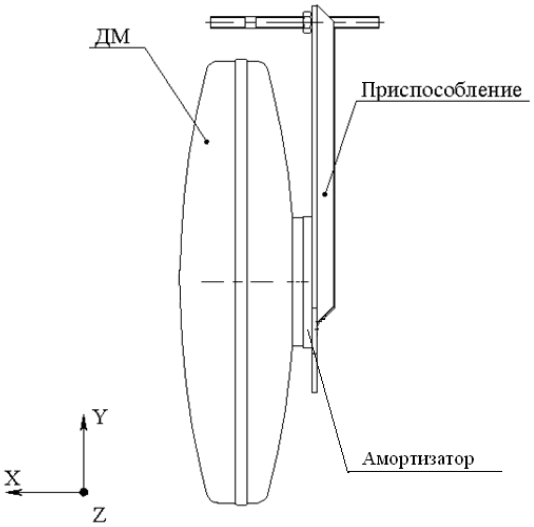


Рис. 3. Схема установки амортизатора на ДМ для измерения вибрационных характеристик

Проведенные испытания заключались в измерении вибрационных характеристик двигателя-маховика в нормальных климатических условиях на свободном упругом подвесе без внешнего виброзащитного устройства, а также совместно с ним.

Запись вибрационных характеристик двигателя проводилась в диапазоне частот вращения от 200 до (6000 ± 100) об/мин при горизонтальном расположении вала. Шаг измерения вращения ротора-маховика составлял 100 об/мин [13–15].

Результаты испытаний. Из графиков сравнения зависимостей виброскорости от частоты вращения ротора-маховика блока ДМ по трем ортогональным осям без амортизатора и совместно с ним (рис. 4–6) следует, что на посадочной поверхности ДМ с амортизатором уровень виброскорости заметно снижается по сравнению с уровнем виброскорости на посадочной поверхности ДМ без амортизатора.

Для определения уровня этого снижения рассчитаны амплитудные коэффициенты эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика (рис. 7–9), определяемые по соотношению

$$K_{\text{эфф}} = \frac{A_{\text{ДМ}}}{A_{\text{ДМ+ам}}},$$

где $A_{\text{ДМ}}$ – амплитудное значение виброскорости на посадочной поверхности ДМ; $A_{\text{ДМ+ам}}$ – амплитудное значение виброскорости на посадочной поверхности амортизатора, предназначенной для контакта с КА.

Из графиков видно, что установка амортизатора между ДМ и КА снижает уровень виброскорости, передаваемой на КА, до 3,5–4 раз (в среднем вдвое) и, следовательно, уменьшает уровень возмущающих моментов, передаваемых на КА. При этом указанное снижение достигается увеличением массы ДМ на 175 г.

Возможное применение. Существует несколько возможных схем применения данного амортизатора: как отдельного блока с копированием установочных отверстий посадочной плоскости ДМ, что позволяет избежать внесения изменений в конструкцию уже разработанных приборов, или как интегрированного в конструкцию вновь разрабатываемого устройства, что обеспечит выигрыш в массе за счет использования общих конструктивных элементов.

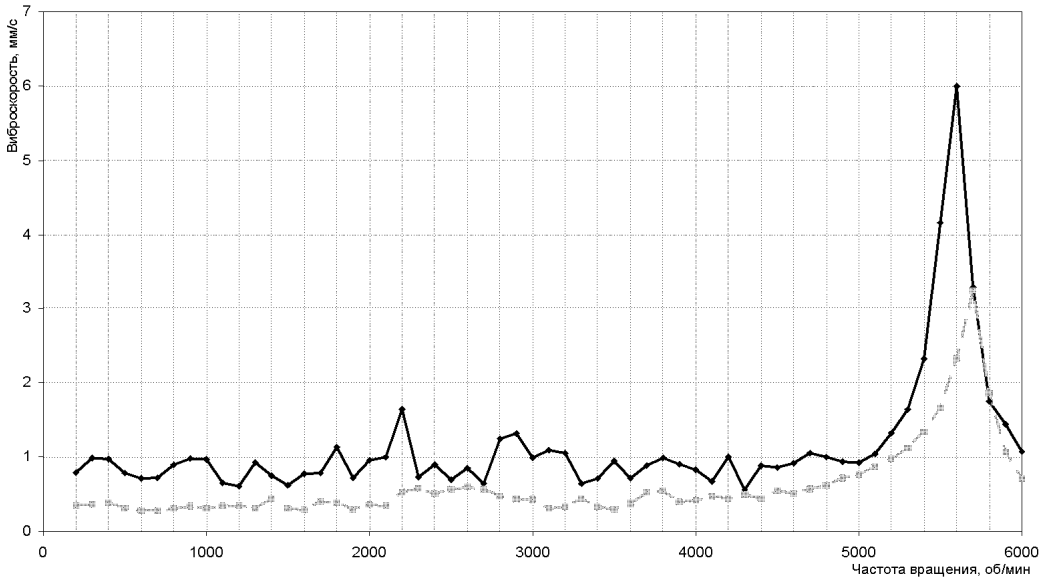


Рис. 4. Зависимость амплитуды виброскорости от частоты вращения ротора-маховика по оси *X* с амортизатором (----) и без него (—)

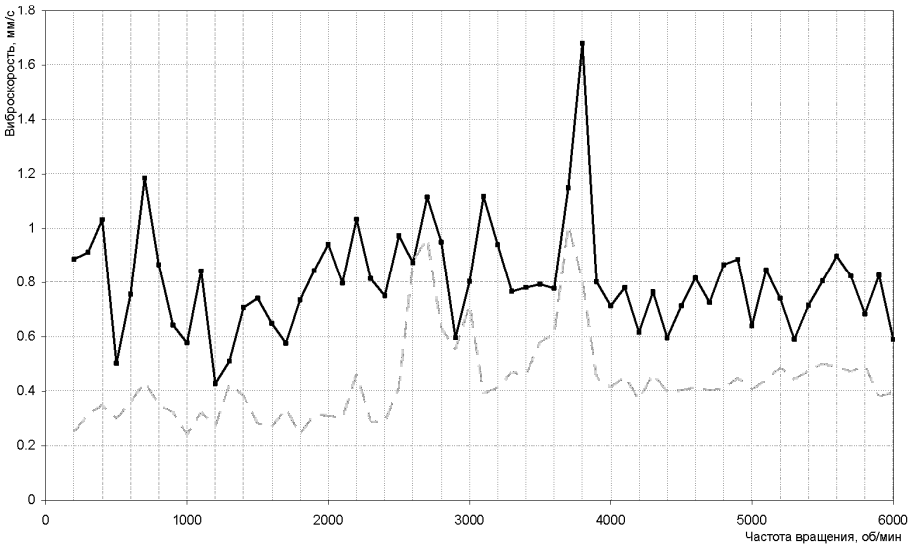


Рис. 5. Зависимость амплитуды виброскорости от частоты вращения ротора-маховика по оси *Y* с амортизатором (----) и без него (—)

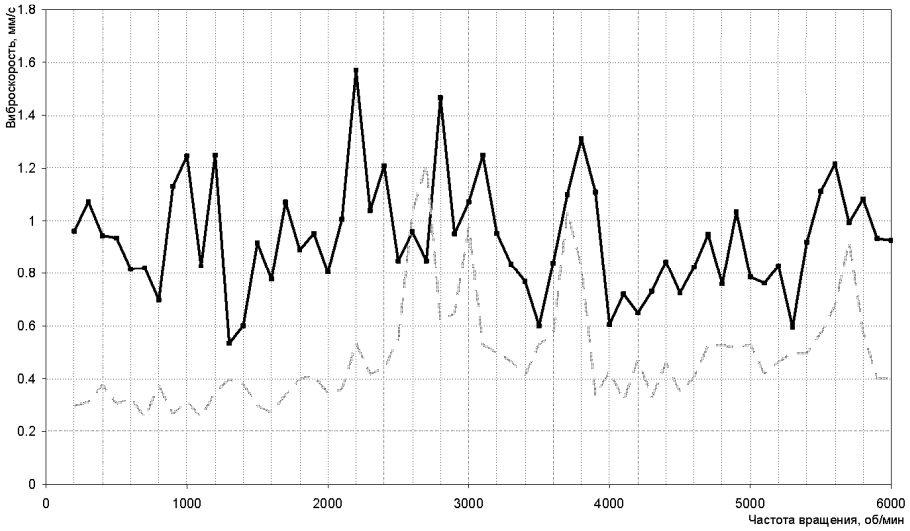


Рис. 6. Зависимость амплитуды виброскорости от частоты вращения ротора-маховика по оси *Z* с амортизатором (----) и без него (—)

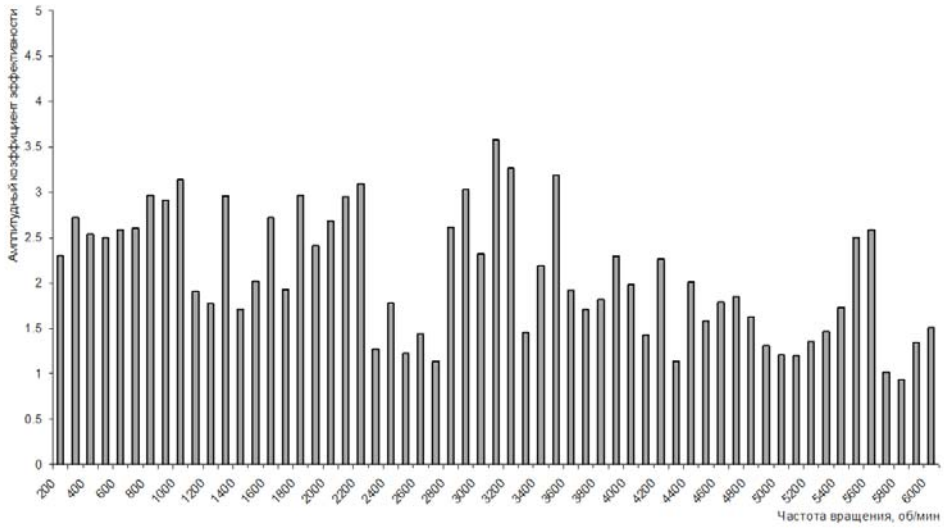


Рис. 7. Зависимость амплитудного коэффициента эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика по оси *X*

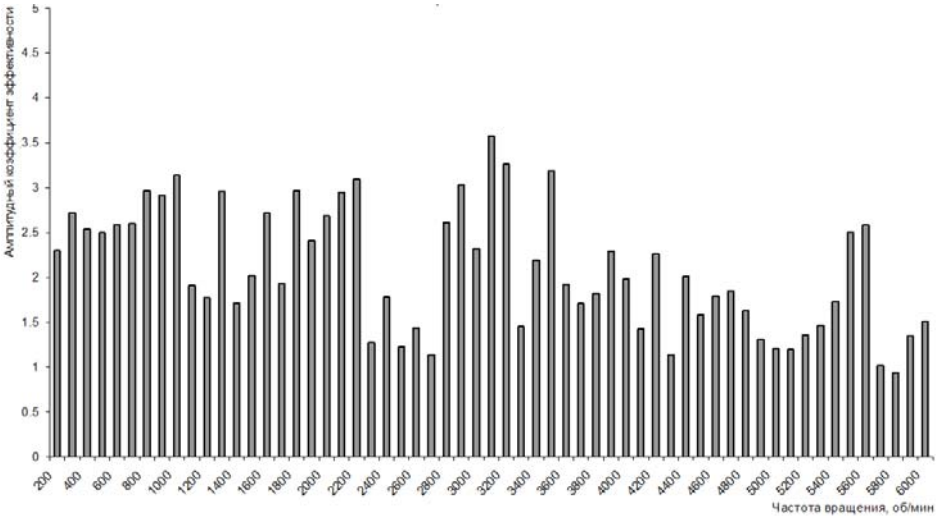


Рис. 8. Зависимость амплитудного коэффициента эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика по оси *Y*

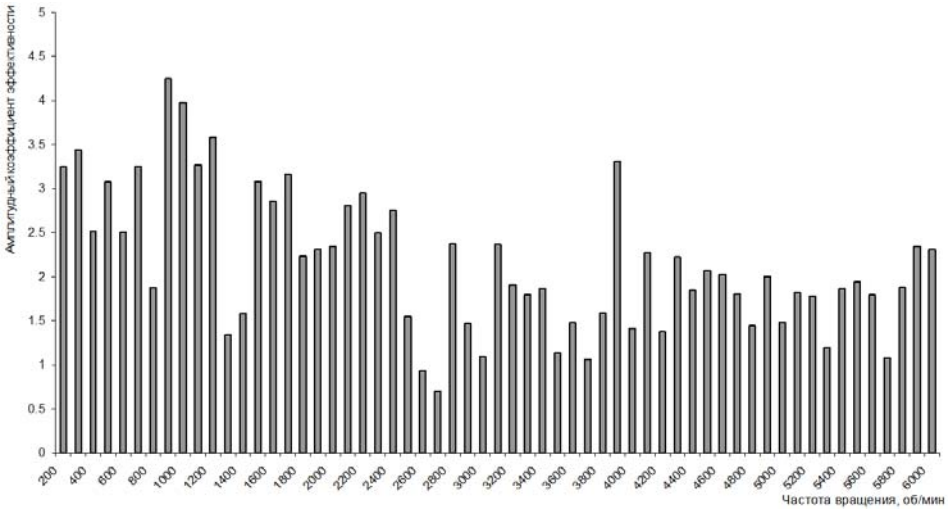


Рис. 9. Зависимость амплитудного коэффициента эффективности применения амортизатора от частоты вращения ротора-маховика по оси *Z*

Заключение. Таким образом, разработанный амортизатор обладает хорошими демпфирующими свойствами и жесткостью, а небольшие массогабаритные характеристики и простота изготовления конструкции позволяют применять его с минимальными доработками в различных приборах, выпускаемых на предприятии.

Библиографические ссылки

1. Гладышев Г. Н., Дмитриев В. С., Копытов В. И. Системы управления космическими аппаратами (Исполнительные органы: назначение, принцип действия, схемы, конструкция) : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2000. 207 с.

2. Влияние жесткости силовых элементов конструкции на величину критической скорости исполнительного органа на базе управляемого по скорости двигателя-маховика (УДМ) / Ю. А. Бритова [и др.] // Контроль. Диагностика. 2012. № 11. С. 24–27.

3. Журавлев В. Ф., Бальмонт В. Б. Механика шарикоподшипников гироскопов / под ред. Д. М. Климова. М. : Машиностроение, 1985. 272 с.

4. Приборные шариковые подшипники : справочник / под ред. К. Н. Явленского [и др.] М. : Машиностроение, 1981. 351 с.

5. Васильцов А. А. Пути минимизации возмущающих воздействий двигателей-маховиков // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. XVIII науч.-техн. конф (22–23 апр. 2010, г. Томск) / ОАО «НПЦ «Полюс». Томск, 2010. С. 197, 198.

6. Ковалев М. П. Опоры и подвесы гироскопических устройств. М. : Машиностроение, 1970. 286 с.

7. 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. : ил.

8. Ли Мин. Демпфирование резонансных колебаний гироскопических систем активным динамическим

гасителем : автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 2009.

9. Унифицированные космические платформы для малых космических аппаратов : справ. пособие / В. Н. Блинов [и др.] // Малые космические аппараты. В 3 кн. Кн. 3. Мини-спутники. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. 348 с.

10. Исакович М. М., Клейман Л. И., Перчанок Б. Х. Устранение вибрации электрических машин. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 200 с. : ил.

11. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергия, 1973. 200 с.

12. Васильцов А. А. Анализ и выбор конструкций амортизаторов для электромеханических устройств // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докл. XVIII науч.-техн. конф (10–11 апр. 2008, г. Томск) / ОАО «НПЦ «Полюс». Томск, 2008. С. 108–110.

13. Сергеев С. И. Демпфирование механических колебаний. Физматгиз, 1959. 439 с.

14. ГОСТ 16819–71. Приборы виброизмерительные. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1988.

15. Иориш Ю. И. Измерение вибраций. Общая теория, методы и приборы. М. : Машгиз, 1956. 404 с.

References

1. Gladyshev G. N., Dmitriev V. S., Kopytov V. I. *Sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami (Ispolnitel'nye organy: naznachenie, printsip deystviya, skhemy, konstruktsiya)* [Control systems of spacecrafts (Executive powers: appointment, a principle of operation, the schemes, a construction)] Tomsk, TPU Publ., 2000, 207 p.

2. Britova Yu. A. et al. [Influence rigidity of power elements of construction on size of critical speed of an executive powers on the base of the engine-flywheel operated on speed]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2012, no. 11, p. 24–27 (In Russ.).

3. Zhuravlev V. F., Bal'mont V. B. *Mekhanika sharikopodshipnikov giroskopov* [Mechanics of ball-bearings of gyroscopes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 272 p.

4. *Pribornye sharikovye podshipniki* [Instrument ball bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 351 p.

5. Vasiltsov A. A. [Means of minimisation of perturbation influence of engines-flywheels]. *Elektronnie i elektromekhanicheskie sistemy I ustroystva. Tez. dokl. XVIII nauch.-tekhnich. Konf (Tomsk, 22-23 apr. 2010).* [Electronic and electromechanical systems and devices: mes. rep. XVIII scientific and engineering. conf (Tomsk, 22–23 April. 2010)]. JSC “NPC “Polyus”. Tomsk, 2010, p. 197,198.

6. Kovalev M. P. *Opory i podvesy giroskopicheskikh ustroystv.* [Bearing and gimbals of gyroscopic equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 286 p.

7. Birger I. A., Shorr B. A., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost’ detaley mashin* [Calculations details of machines on durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 702 p.

8. Li Min. *Dempfirovanie rezonansnykh kolebanij giroskopicheskikh sistem aktivnym dinamycheskim gasitelem. Dis. kandidat. technich. nauk.* [Decrement resonant frequency of gyroscopic systems by active dynamic extinguisher. Author. Dis. Cand. Tehn. Sciences.]. Moscow, 2009.

9. Blinov V. N. et al. *Unifitsirovannye kosmicheskie platformy dlya malykh kosmicheskikh apparatov. Spravoch. posobie* [The unified space platforms for small spacecrafts. Grant manual]. Omsk, 2010, 348 p.

10. Isakovich M. M., Kleyman L. I., Perchanok B. Kh. *Ustranenie vibratsii elektricheskikh mashin.* [Elimination of vibration in electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 200 p.

11. Shubov I. G. *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin.* [Din and vibration of electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1973, 200 p.

12. Vasil'tsov A. A. [Analysis and selection construction of the shock-absorber for electrical devices]. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva: tez. dokl. XVIII nauch.-tekhn. Konf.* [Electronic and electromechanical systems and devices: mes. rep. XVIII scientific and engineering. conf (Tomsk, 10–11 April. 2008)]. JSC “NPC “Polyus”, Tomsk, p. 108–110 (In Russ.).

13. Sergeev S. I. *Dempfirovanie mekhanicheskikh kolebaniy* [Decrement of mechanical oscillation]. Fizmatgiz Publ., 1959, 439 p.

14. *GOST 16819–71 Pribory vibroizmeritel'nye. Terminy i opredelenija* [State Standart 16819–71. Vibration-survey devices. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1988 (In Russ.).

15. Iorish Yu. I. *Izmerenie vibratsiy. Obshchaya teoriya, metody i pribory*. [Measuring of vibration. General theory, methods and devices]. Moscow, Mashizd Publ., 1956, 404 p.

© Васильцов А. А., Липовцев А. А., 2015

УДК 004.4.242

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 183–187

МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ ПОДГОТОВКИ ТИПОВЫХ РАБОТ ПО УПРАВЛЕНИЮ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Н. А. Космынина

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: n.kosmynina@list.ru

Типовые работы представляют собой командные скрипты, написанные на специализированном проблемно-ориентированном языке, применяемые для управления космическими аппаратами производства АО «ИСС». Типовые работы формализуют последовательность команд для выдачи, условия их выдачи и некоторые вспомогательные операции, например, вывод на экран сообщения для привлечения внимания оператора.

Все типовые работы, необходимые для штатного управления космическими аппаратами, разрабатываются и тестируются на базе АО «ИСС», а затем поставляются в составе других исходных данных управления. Также поддерживается возможность разрабатывать свои собственные типовые работы, следуя синтаксическим правилам языка управления.

Рассмотрена технология подготовки типовых работ, применяемая на АО «ИСС»: типовые работы разрабатываются вручную, на основе эксплуатационной документации по управлению, содержащей все необходимые данные в стандартном формате, в виде таблиц. Выделены недостатки данного метода: большое количество затрачиваемого времени, возможность ошибок, вызванных влиянием человеческого фактора.

Предложен метод автоматизации процесса подготовки типовых работ: использование алгоритма, который на основе анализа текстов эксплуатационной документации составляет типовые работы по управлению космическими аппаратами.

В ходе выполнения исследования были рассмотрены некоторые из существующих программных систем управления производства США, Испании, Японии и др., где, несмотря на широкое использование скриптовых языков управления, аналогов данному алгоритму найдено не было.

Разработан прототип программного обеспечения, реализующего указанный метод, доказана его эффективность: использование данного прототипа показало значительное увеличение скорости разработки типовых работ.

Данное ПО предполагается использовать для подготовки типовых работ по управлению космическими аппаратами разработки АО «ИСС».

Ключевые слова: управление космическими аппаратами, язык управления космическими аппаратами, исходные данные по управлению космическими аппаратами.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 183–187

AUTOMATION METHOD OF SATELLITE CONTROL SCRIPTS CREATION

N. A. Kosmynina

JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: n.kosmynina@list.ru

Control scripts are programs, written in specialized problem-oriented language, and used to control JSC “ISS” satellites. Control scripts formalize the sequence of commands to be uploaded, conditions for the command to be sent and some additional operations e. g. displaying a message to attract operator’s attention.

All control scripts needed for routine satellite control are generated and tested by JSC “ISS” experts, and supplied as part of other initial data. In addition the possibility to generate new control scripts following the syntax rules of control scripts language is allowed.

Process of satellite control script preparation, used in JSC “ISS”, is reviewed in this article. Control scripts are prepared manually, based on satellite control documentation, which contains all data needed. This method has the following disadvantages: a lot of time is required to create the scripts; possibility of errors due to human factor.

Automatization method of control script preparation was designed: to use an algorithm of automatic control documentation analysis, which generates satellite control scripts in automatic mode.

During the research several existing satellite control systems employed in the USA, Spain, Japan, etc. production were reviewed, but in spite of extensive use of satellite control languages, the similar algorithms were not found.

The suggested method was implemented in the software prototype and its effectiveness was shown: application of the tool reduces control scripts generation time.

The software is intended to be used to create control scripts to work with the satellites produced by JSC "ISS".

Keywords: satellite control, satellite control language, satellite control initial data.

Введение. Управление космическим аппаратом (КА) в полете представляет собой выдачу последовательности команд в соответствии с текущими целями управления, планами работы с КА и анализом текущего состояния КА, выполняемого на основе поступающей телеметрии.

Управление КА осуществляется в соответствии с эксплуатационной документацией (ЭД), регламентирующей последовательность команд, паузы между ними, условия выдачи команд, необходимые проверки и др.

В АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «ИСС») ЭД представляет собой набор текстовых документов, содержащих описание процедур управления (последовательностей команд, имеющих одну общую цель) в виде таблиц специализированной структуры, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Формат описания процедур управления в ЭД

Номер шага	Действие оператора	Время	Команда	Контроль
1	***	***	***	***
2	***	***	***	***

Данная таблица содержит ячейки следующего назначения:

– «Номер шага» – номер указанной команды в общей последовательности команд, составляющих данную процедуру;

– «Действие оператора» – текстовое описание предполагаемого воздействия на КА;

– «Время» – пауза между выполнением предыдущей команды и следующей;

– «Команда» – номер управляющего воздействия для выдачи на КА;

– «Контроль» – описание ТМ-параметров и интервала, в который они должны попадать для подтверждения штатного выполнения указанной команды.

В АО «ИСС» для описания последовательности команд управления КА, применяемых для управления и описанных в ЭД, используется специализированный проблемно-ориентированный язык – ЯОТР, с помощью которого составляются скрипты управления, называемые типовыми работами (ТР). ТР создаются вручную на основе данных, содержащихся в ЭД, и предусматривают логику выдачи всех команд управления КА, включая паузы, проверки условий, и т. д.

С помощью специального программного обеспечения управления (СПО-У) типовые работы в ходе сеанса связи с КА можно запустить на исполнение в ручном (с подтверждением каждой выданной команды человеком-оператором) или автоматическом режиме.

Приведем пример реальной типовой работы, предусматривающей выдачу команды 6701 по результатам анализа значения ТМ-параметра CN02S0:

```
О | 1  | | ПРОГРАМ    |       |              | |
О | 2  | | ПАУЗА      |       | 00:00:05     | |
О | 3  | | ЖДАТЬ      |       | 00:00:05     | |
  | 4  | | CN02S0     |       | 0            | |
О | 5  | | ЕСЛИТО     |       |              | |
  | 6  | | #ГШТАТ     |       | 1            | |
О | 7  | | ПЕЧАТЬ     |       |              | |
Ф | 8  | Внимание! КНВ WCN 2 уже включен! (CN02S0=1)
О | 9  | | СТОП       |       |              | |
О | 10 | | КЕСЛИТО    |       |              | |
О | 11 | | ВЫЗВАТЬ    |       | _ПК          | |
  | 12 | | 6701       | &1    |              | |
О | 13 | | КПРОГРАМ   |       |              | |
```

В настоящее время ТР создаются вручную, на основе ЭД. Такой способ создания имеет ряд следующих недостатков:

– занимает значительное время;

– потенциально является источником ошибок, вызванных человеческим фактором;

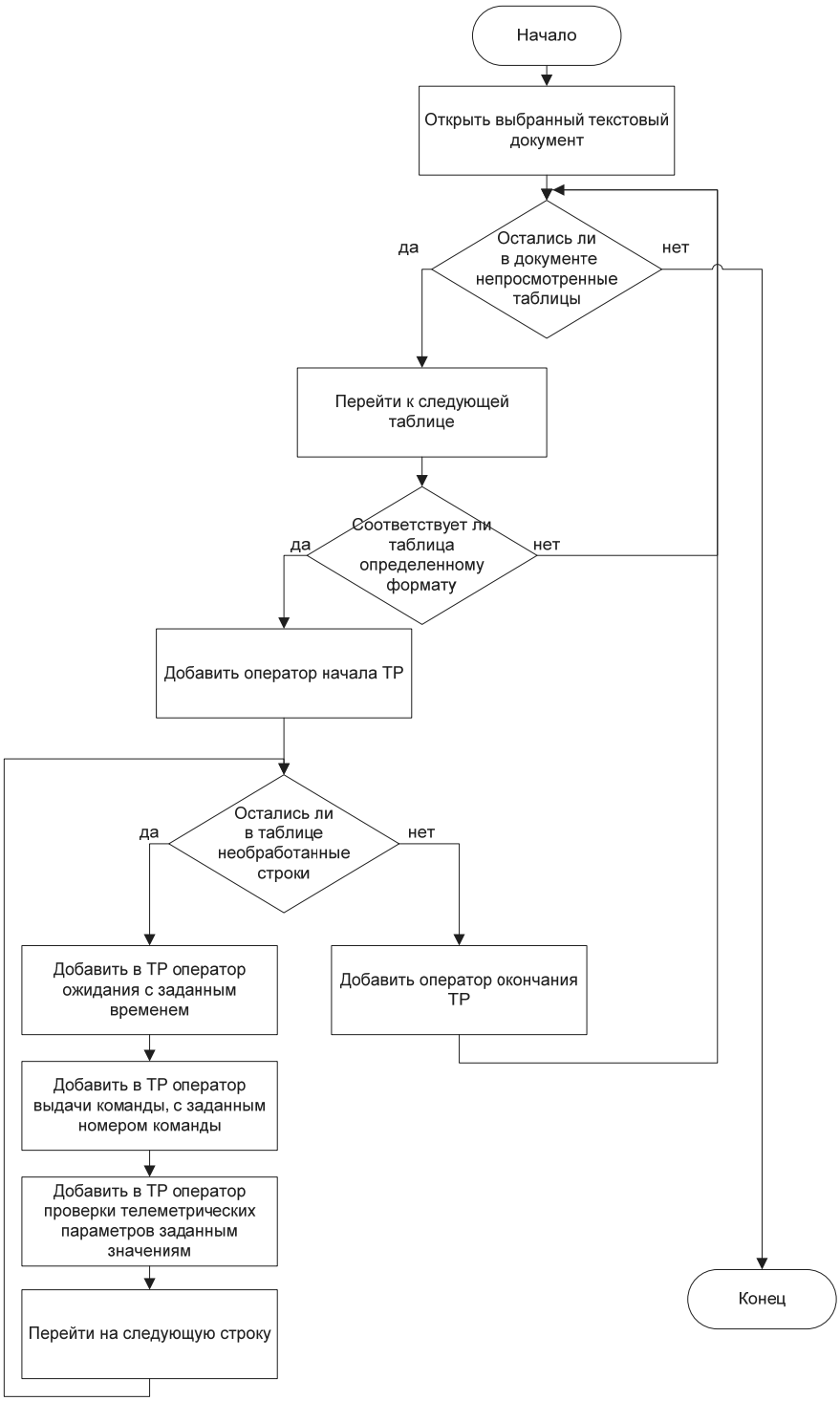
– требует (базовых) навыков программирования.

Для устранения перечисленных недостатков необходимо упростить и автоматизировать процесс подготовки ТР.

Предлагаемый способ автоматизации. Предлагается автоматизировать существующую в АО «ИСС» технологию подготовки типовых работ с помощью применения алгоритма, позволяющего в автоматическом режиме формировать процедуру управления на языке ЯОТР на основе анализа ЭД, содержащей описание процедур управления.

В общем случае данный алгоритм можно представить следующим образом: проанализировать указанный пользователем документ на наличие таблиц определенного формата, последовательно переходя от таблицы к таблице и от строки к строке в текущей обрабатываемой таблице, формировать текст ТР в соответствии с синтаксическими правилами языка описания ТР с учетом данных, содержащихся в соответствующих ячейках. Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рисунке.

Предлагаемый алгоритм был реализован с использованием следующего инструментария: язык C++, библиотека QT 4.8.6 как основные средства, применяемые при разработке СПО-У, куда после проведения необходимых испытаний предполагается встроить данное ПО.



Блок-схема алгоритма автоматического формирования ТР на основе анализа ЭД

Использование прототипа ПО, реализующего данный алгоритм, показало значительное увеличение скорости разработки типовых работ.

В общем случае время работы алгоритма зависит от используемого аппаратного обеспечения, настроек операционной системы, количества запущенных в системе процессов и т. д. Полученные аналитические данные для ЭВМ, на которой предполагается вести разработку типовых работ, представлены в табл. 2.

При использовании ПО, реализующего предлагаемый алгоритм, значительно уменьшается время, затрачиваемое на разработку ТР. Помимо этого, уменьшается количество потенциальных ошибок в текстах ТР, вызванных влиянием человеческого фактора.

Аналоги рассматриваемой системы. Проблемно-ориентированные языки широко применяются для управления КА по всему миру (см. табл. 1), однако описаний технологий, аналогичных разрабатываемой, в открытых источниках найдено не было.

Рассмотренные системы управления представлены в табл. 3.

Таблица 2

Оценки времени, затрачиваемого на подготовку типовых работ с применением ручного и автоматизированного методов

Название КА	Название документа, входящего в состав ЭД	Число страниц, содержащих описание ТР, стр.	Затраченное время при ручном вводе типовых работ, ч	Затраченное время при использовании предложенного метода, с
Экспресс-АТ1	Инструкция по управлению в полете. Часть первая. Порядок управления	16	4	16
Экспресс-АТ1	Инструкция по разработке программы полета. Часть вторая. Типовая программа полета Приложение 2. Программа полета на этапе эксплуатации	34	8	16
Экспресс-АТ1	Инструкция по разработке программы полета. Часть вторая. Типовая программа полета Приложение 1. Программа ввода в эксплуатацию	151	40	22

Таблица 3

Языки и ПО управления КА

Язык	ПО, разработчик, страна разработки
SSL	ПО OS/COMET, Harris, США [1]
OCIL/ CECIL	ПО ECLIPSE, Raytheon, США [2; 3]
PIL, UCL, ELISA	ПО OPEN CENTER, Astrium, Евросоюз [4]
Python, STOL	ПО GSEOS, I&T, США [5; 6]
TCL, Ares	ПО EPROCH Kratos Integral Systems International, США [7]
PLUTO	ПО SCOS Mission Control System, SciSys, Англия, Германия [8; 9]
Python, SOL	ПО Hifly, GMV, Испания [10; 11]
SCL	ПО SCL, Interface & Control Systems, Inc., США [12]
JAS	ПО InControl L3, США [13; 14]
Без названия	ПО SMACS, NASDA, Япония [15]

Заключение. В ходе выполнения данной работы проанализирована технология подготовки типовых работ по управлению КА, применяемая на АО «ИСС», предложен метод автоматизации данного процесса на основе разработанного алгоритма, аналогов которому в открытых источниках найдено не было.

Разработан прототип программы, реализующий указанный метод. Измерения времени, затрачиваемого на подготовку типовых работ в случае ручного ввода текстов ТР и при автоматической их генерации разработанным программным обеспечением, показали значительное уменьшение времени в случае использования последнего.

В дальнейшем, по окончании процесса разработки и соответствующего тестирования, предполагается встроить разработанное ПО в состав СПО-У для использования в процессе подготовки ТР для управления КА разработки АО «ИСС».

Библиографические ссылки

1. Satellite Command and Control [Электронный ресурс]. URL: http://govomm. harris.com/oscomet/pdf/OSCprods.pdf (дата обращения: 23.09.2014).

2. Migration of the Operations of a Legacy Multi-Satellite System to a state-of-the-art Ground System [Электронный ресурс]. URL: http://enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-6622.pdf (дата обращения: 23.09.2014).

3. RAYTHEON ECLIPSE satellite command and control software offers more options, max performance [Электронный ресурс]. URL: http://www.m2.com/m2/ web/story.php/ 1999852568440080DDE88025683A00414DA1 (дата обращения: 23.09.2014).

4. AstroTerra Control Ground Segment: Operations concept and implementation [Электронный ресурс]. URL: http://www.spaceops2012.org/proceedings/documents/id1289133-Paper-001.pdf (дата обращения: 23.09.2014).

5. GSEOS Ground Support Equipment Operating System [Электронный ресурс]. URL: http://www.gseos.com/home.php (дата обращения: 23.09.2014).

6. Ground Support Equipment Operating System [Электронный ресурс]. URL: http://gseos.com/doc/Gseos6.0/HTML/index.html (дата обращения: 23.09.2014).

7. Using ARES to Improve Efficiency in Satellite Operations [Электронный ресурс]. URL: http://www.powershow.com/view/1c44e-NjEwM/Using_ARES_to_

Improve_Efficiency _in_Satellite_Operations_powerpoint_ ppt_presentation (дата обращения: 23.09.2014).

8. The PLUTO operations procedure language and its use for RADARSAT-2 mission operations. [Электронный ресурс]. URL: http://arc.aiaa.org/ doi/pdf/10.2514/6.2004-538-333 (дата обращения: 23.09.2014).

9. Lessons learned from 10 years building ground M&C Systems [Электронный ресурс]. URL: http://www.spaceops2012.org/proceedings/documents/id1 291466-Paper-003.pdf (дата обращения: 23.09.2014).

10. 21st century operational procedure automation with Python and autofly. Lessons learned from migrating legacy systems and developing new ones. [Электронный ресурс]. URL: http://download.improve2.org/u/use-of-python-as-a-satellite-operations-and-testing-automation-book-w728/ (дата обращения: 23.09.2014).

11. Limitless Automation: ANY CONOPS. [Электронный ресурс]. URL: http://www.spaceops2012. org/proceedings/documents/id1272487-Paper-001.pdf (дата обращения: 23.09.2014).

12. Use of Spacecraft Command Language for Advanced Command and Control Applications. [Электронный ресурс]. URL: http://ntrs.nasa.gov/ archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015644.pdf (дата обращения: 23.09.2014).

13. Satellite Command and Control Software InControl [Электронный ресурс]. URL: http://www. storm.com/media/L3_incontrol_main_0810_01_loop.swf (дата обращения: 23.09.2014).

14. Factory Test and Ground System Monitor and Control [Электронный ресурс]. URL: http://www2.l-3 com.com/tw/pdf/datasheets/InControl_Brochure_2010.pdf (дата обращения: 23.09.2014).

15. Spacecraft control system Development [Электронный ресурс]. URL: http://Arc.Aiaa.Org/ Doi/Pdf/10.2514/6.2002-T3-27 (дата обращения: 23.09.2014).

References

1. Satellite Command and Control. Available at: http://govomm. harris.com/oscomet/pdf/OSCprods.pdf (accessed 23.09.2014).

2. Migration of the Operations of a Legacy Multi-Satellite System to a state-of-the-art Ground System. Available at: http://enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-6622.pdf (accessed 23.09.2014).

3. RAYTHEON ECLIPSE satellite command and control software offers more options, max performance Available at: http://www.m2.com/m2/web/story.php/ 1999852568440080DDE88025683A00414DA1 (accessed 23.09.2014).

4. AstroTerra Control Ground Segment: Operations concept and implementation. Available at: http://www.spaceops2012.org/proceedings/documents/id1 289133-Paper-001.pdf (accessed 23.09.2014).

5. GSEOS Ground Support Equipment Operating System. Available at: http://www.gseos.com/home.php (accessed 23.09.2014).

6. Ground Support Equipment Operating System. Available at: http://gseos.com/doc/Gseos6.0/HTML/ index.html (accessed 23.09.2014).

7. Using ARES to Improve Efficiency in Satellite Operations. Available at: http://www.powershow.com/ view/1c44e-NjEwM/Using_ARES_to_Improve_Efficiency _in_Satellite_Operations_powerpoint_ppt_presentation (accessed 23.09.2014).

8. The PLUTO operations procedure language and its use for RADARSAT-2 mission operations. Available at: http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2004-538-333 (accessed 23.09.2014).

9. Lessons learned from 10 years building ground M&C Systems Available at: http://www.spaceops2012. org/proceedings/documents/id1291466-Paper-003.pdf (accessed 23.09.2014).

10. 21st century operational procedure automation with Python and autofly. Lessons learned from migrating legacy systems and developing new ones. Available at: http://download.improve2.org/u/use-of-python-as-a-satellite-operations-and-testing-automation-book-w728/ (accessed 23.09.2014).

11. Limitless Automation: ANY CONOPS. Available at: http://www.spaceops2012.org/proceedings/documents/ id1272487-Paper-001.pdf (accessed 23.09.2014).

12. Use of Spacecraft Command Language for Advanced Command and Control Applications. Available at: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/ 20110015644.pdf (accessed 23.09.2014).

13. Satellite Command and Control Software InControl. Available at: http://www.storm.com/media/ L3_incontrol_main_0810_01_loop.swf (accessed 23.09. 2014).

14. Factory Test and Ground System Monitor and Control. Available at: http://www2.l-3com.com/tw/pdf/ datasheets/InControl_Brochure_2010.pdf (accessed 23.09.2014).

15. Spacecraft control system Development. Available at: http://Arc.Aiaa.Org/Doi/Pdf/10.2514/ 6.2002-T3-27 (accessed 23.09.2014).

© Космынина Н. А., 2015

УДК 621.382

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 188–192

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИЦЕВОГО СЛОЯ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА

Ю. Ю. Логинов[1]*, А. В. Брильков[2], А. В. Мозжерин[1,2]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, просп. Свободный, 79
*E-mail: loginov@sibsau.ru

Рассмотрено влияние сопротивления лицевого слоя солнечного элемента (СЭ) на выходные характеристики устройства. Солнечные элементы активно используются в производстве солнечных батарей космических аппаратов, и эффективность работы СЭ влияет на время жизни изделия. В настоящее время прилагаются значительные усилия для увеличения эффективности солнечных элементов (СЭ). Минимизация сопротивления n^+-канала позволяет улучшить качество СЭ при длительной эксплуатации изделия, например, в условиях радиационного воздействия в космосе. Поэтому интересно рассмотреть более точные модели учета влияния омических потерь n^+-канала на вольт-амперные характеристики СЭ. На основе дифференциальных уравнений для распределения потенциалов и токов в лицевом n^+-слое солнечных элементов n^+-p-типа получено выражение для их вольт-амперных характеристик (ВАХ) в зависимости от параметров лицевого слоя. Это позволило уточнить влияние сопротивления лицевого n^+-слоя (R) на выходные характеристики СЭ ($I_{кз}$, V_{xx}, коэффициент заполнения), связав их с параметрами n^+-p-перехода. Предложен простой алгоритм численного решения указанных уравнений с расчетом ВАХ СЭ. Показано, что при сопротивлении лицевого слоя $R > R_n$ (~ 4 Ом/см^2) ток короткого замыкания ($I_{кз}$) и коэффициент заполнения (η) уменьшаются обратно пропорционально $\sqrt{R}$, а при $R < R_n$ ВАХ практически не зависит от R. Полученные результаты могут быть использованы при анализе работы солнечных батарей космических аппаратов.

Ключевые слова: солнечные элементы, вольт-амперная характеристика, сопротивление лицевого слоя, p-n-переход, ток короткого замыкания.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 188–192

THE INFLUENCE OF SURFACE LAYER RESISTANCE ON OUTPUT CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS

Y. Y. Loginov[1*], A. V. Brilikov[2], A. V. Mozherin[1,2]

[1]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
*E-mail: loginov@sibsau.ru

The influence of surface layer resistance of the solar cell on the output characteristics of the device is considered. The solar cells are widely used in the production of spacecraft solar panels and the efficiency of the solar cell affects the lifetime of the vehicle. Currently, there are significant efforts to increase the efficiency of solar cells (SC). Minimizing resistance of n^+-channel allows improve quality of solar cells during prolonged operation, for example in terms of radiation exposure in space. It is therefore interesting to consider more accurate models into account the effect of ohmic losses n^+-channel on current-voltage characteristics of solar cells. On the basis of the differential equations for distribution of potentials and currents in a surface n^+-layer of n^+-p-type solar cells new expression for current-voltage characteristics is received. It has allowed to specify influence of surface n^+-layer resistance (R) on output characteristics of solar cells (short circuit current, open circuit voltage, fill factor) in accordance with parameters of n^+-p-junction. The simple algorithm of the numerical solution of the specified equations with calculation current-voltage characteristics of solar cells is offered. It is shown, that at the resistance of surface layer $R > R_n$ (~ 4 Ω·cm^2) the short-circuit current J_{SC} and the fill factor (η) decreases inversely proportional to $\sqrt{R}$, and for $R < R_n$ the current-

voltage characteristic practically is not depend on R. The obtained results can be used in analysing the operation of spacecraft solar cells.

Keywords: solar cells, the current-voltage characteristic, the resistance of surface layer, p-n-junction, short-circuit current.

Ведение. Солнечные элементы широко используются в космических аппаратах [1–12]. Одной из важнейших задач технологии солнечных элементов (СЭ) с лицевым n^+-слоем является уменьшение омических потерь этого слоя на фоне других факторов, ухудшающих рабочие параметры СЭ.

Обычное выражение для ВАХ СЭ [11–14]:

$$I_C = -I_{pn} + I_v, \tag{1}$$

где

$$I_{pn} = I_0\left(e^{\frac{q(V+I_C R)}{\Theta}} - 1\right), \tag{2}$$

где

$$\Theta = kT\ ;\ R = \frac{\rho l_1}{w l_2}\ ; \tag{3}$$

R – сопротивление лицевого слоя; ρ – его удельное сопротивление; w – толщина; l_1 – длина (от середины n^+-слоя до собирающего электрода); l_2 – протяженность собирающего электрода; I_v – фототок СЭ при $R = 0$; I_{pn} – обратный ток из n^+-канала в p-область; I_0 – обратный темновой ток p-n-перехода.

Уравнения (1), (2) отражают модель, в которой сопротивление лицевого слоя учтено как последовательно соединенное с p-n^+-переходом сопротивление.

Минимизация сопротивления n^+-канала должна осуществляется самосогласованно с конструкцией СЭ, обеспечивать максимальную прозрачность лицевого слоя для проникновения в p-область света, а главное, не ухудшать это качество при длительной эксплуатации СЭ, например, в условиях радиационного воздействия в космосе.

В связи с этим интересно рассмотреть более точные модели учета влияния омических потерь n^+-канала на вольт-амперные характеристики СЭ.

Влияние сопротивления n^+-канала на вольт-амперные характеристики СЭ. В [13–15] показано, что для расчета вольт-амперных характеристик СЭ с n^+-каналом, необходимо использовать уравнения рассредоточенных токов $j(x)$ и потенциалов $\varphi(x)$ в канале. Учитывая, что возрастание тока Δj на пути Δx в канале обусловлено притоком электронов из p-области – $I_\text{ф} l_2 \Delta x$, запишем:

$$\frac{dj}{dx} = l_2 I_\text{ф}, \tag{4}$$

где l_2 – протяженность собирающего электрода,

$$I_\Phi = -I_{pn} + I_v; \tag{5}$$

$$I_{pn} = I_0\left(e^{\frac{q\varphi}{\Theta}} - 1\right). \tag{6}$$

Аналогичным образом для падения напряжения в n-канале запишем

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{R}{l_1} j. \tag{7}$$

Из (7) получим:

$$\Delta\varphi = \left(-V + \varphi_0\right) = R\frac{1}{l_1}\int_0^{l_1} j(x)dx. \tag{8}$$

Решение уравнений (4)–(7) будем рассматривать с учетом граничных условий:

$$\left.\begin{array}{l} j = 0,\ \varphi = \varphi_0 \ \text{ при } x = 0 \\ j = I,\ \varphi = V \ \text{ при } x = l_1 \end{array}\right\}, \tag{9}$$

где φ_0 – потенциал середины n^+-слоя.

Влияние сопротивления лицевого слоя на параметры СЭ можно проанализировать с помощью компьютерного интегрирования уравнений (5)–(7). Для этого преобразуем их по методу конечных разностей, превратив их в следующие рекуррентные отношения:

$$j_{k+1} = j_k + I_\text{ф}(\varphi_k)\Delta k, \tag{10}$$

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k - R j_k \Delta k, \tag{11}$$

где

$$I_\text{ф}(\varphi_k) = I_v - I_0\left(e^{\frac{q\varphi_k}{\Theta}} - 1\right). \tag{12}$$

Систему рекуррентных соотношений (10)–(12) будем решать при граничных условиях:

$$\left.\begin{array}{l} j_k = 0,\ \varphi_k = \varphi_0 \ \text{ при } k = 0\ (x = 0) \\ j_N = I,\ \varphi_N = V \ \text{ при } k = N\ (x = l_1) \end{array}\right\}. \tag{13}$$

Здесь $N\Delta k = 1$, $l_1 = N\Delta x$, N – число разбиений участка l_1 на элементы Δx. При этом (как и выше) здесь и ниже токи I_v, I_0, $I_\text{ф}$, j_k и сопротивление R будем относить к единице освещенной поверхности СЭ так, что $l_1 l_2 = 1$.

При этом φ_0 (потенциал середины n^+-слоя) так же, как и все j_k и φ_k, независимы, а I_v, I_0, R и l_1 являются параметрами модели, от которых следует изучить зависимость ВАХ СЭ.

С учетом нелинейности уравнения (12) решение уравнений (10), (11) требует нестандартного подхода. В нашем случае задача существенно упрощается, если φ_0 рассматривать как аргумент, от которого выходные ток $jN = I$ и напряжение $\varphi_0 = V$ зависят параметрически.

Из физических соображений следует, что φ_0 лежит в интервале $\varphi_\text{кз} \le \varphi_0 \le V_{xx}$. Каждому φ_0 в этом

интервале однозначно соответствует своя пара значений $\varphi N = V$ и $jN = I$, совокупность которых и образует ВАХ СЭ. При этом $\varphi_{кз}$ определяется как то значение φ_0, при котором $V = 0$ и $I = I_{кз}$.

На рис. 1 показана серия ВАХ, рассчитанных для типичных СЭ с параметрами $I_v = 25$ мА/см^2 и $V_{xx} = 0{,}6$ В и различающимися сопротивлениями лицевого слоя R (на рис. 1 приведены кривые для различных l_1, так как $R \sim l_1$).

Для анализа результатов рассмотрим уравнения (4)–(7) интегрированием их отношения:

$$jdj = -\frac{1}{R} I_{ф}(\varphi) d\varphi. \qquad (14)$$

Здесь и ниже положено $l_1 l_2 = 1$, и поэтому $I_ф$, I_v, I, а также R будут рассматриваться на единицу освещаемой поверхности СЭ.

Учитывая (5), интегрирование (14) дает

$$j^2 = \frac{2}{R}\left[\Phi(\varphi_0) - \Phi(\varphi)\right],$$

где
$$\Phi(\varphi) = (I_v + I_0)\varphi - \frac{\Theta}{q}\left(e^{\frac{q\varphi}{\Theta}} - 1\right) I_0. \qquad (15)$$

Здесь φ_0 (как и выше) – потенциал середины ($x = 0$) n^+-слоя. Это уравнение справедливо и для $x = l_1$, где $j = I$ и $\varphi = V$. При этом для ВАХ СЭ получается следующее уравнение:

$$I^2 = \frac{2}{R}\left[\Phi(\varphi_0) - \Phi(V)\right],$$

$$I^2 = \frac{2}{R}\Delta\varphi\left[I_v + I_0 - I_0 e^{\frac{qV}{\Theta}} F(\alpha)\right], \qquad (16)$$

где

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - V, \quad \alpha = \frac{q}{\Theta}\Delta\varphi, \quad F(\alpha) = \frac{e^{\alpha} - 1}{\alpha}. \qquad (17)$$

В этих уравнениях фигурирует параметр φ_0, для определения которого можно использовать уравнение (7) в интегральной форме:

$$R = \int_V^{\varphi_0} \frac{d\varphi}{j(\varphi)}. \qquad (18)$$

Из (15) и (16) устанавливается следующая связь между $\varphi_{кз}$ и $I_{кз}$:

$$I_{кз}^2 = \frac{2}{R}\Phi(\varphi_{кз}). \qquad (19)$$

При больших R $\left(R \sim \frac{V_{xx}}{I_{кз}}\right)$ максимальное значение $I_{кз}^2$ достигается при $\varphi \approx V_{xx}$ и согласно (19) зависит от R по закону

$$I_{кз}^2 = \frac{2}{R}\Phi(\varphi_{кз}). \qquad (20)$$

В то же время при малых R $\left(R << \frac{V_{xx}}{I_{кз}}\right)$ величина $\varphi_{кз} \approx \frac{1}{2} R I_{кз}$ и поэтому $I_{кз} \approx I_v$, т. е. слабо зависит от R.

На рис. 1 видно, что при $R < R_n \approx 4$ Ом/см^2 вольт-амперная характеристика СЭ приближается к идеальной, у которой $I_{кз}$ не зависит от R. В то же время при $R > R_n$ эти параметры уменьшаются обратно пропорционально $\sqrt{R}$ в полном соответствии с (19) и (20).

Необходимо отметить, что при больших расстояниях между электродами в середине межэлектродного пространства даже при токе короткого замыкания должна существовать «нейтральная» зона, в которой фототоки сбалансированы обратными токами из n^+-канала в базовую p-область. Протяженность этой части канала будет определяться из условия $j(x = l_1 - \lambda) = \gamma I$, где $\gamma << 1$ – величина, задающая требуемую точность расчетов (~0,01), λ – протяженность активного участка канала, прилегающего к электродам, в котором собирается основная часть фототока.

Если на этом ($l_1 - \lambda < x < l_1$) участке n^+-канала пренебречь обратными токами, то возрастание тока в n^+-канале в λ-области будет происходить по линейному закону, и тогда, как не трудно показать с помощью (8),

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{l_1}\frac{1}{2} RI. \qquad (21)$$

Здесь величина $v = \lambda/l_1$ представляет собой долю активной части лицевого слоя СЭ. Она зависит не только от l_1 (точнее – от R), но и от выходных тока и напряжения СЭ. Пользуясь численными методами, изложенными выше, мы рассчитали $\Delta\varphi$ и $v = \Delta\varphi/½IR$ в зависимости от I и V серии СЭ с разными R. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Из этих расчетов видим, что в хорошем приближении ВАХ СЭ приближается к идеальной ($v \approx 1$) при $R < R_n$, где $R_n = 4$ Ом/см^2. В то же время при $R > R_n$ область идеальности уменьшается в сторону меньших выходных напряжений ($V < V_n$, где $V_n = 0{,}45$ В для $R = 6$ Ом/см^2 и $V_n = 0{,}22$ В для $R = 25$ Ом/см^2) и, следовательно, больших токов. Параметр неидеальности v связан с коэффициентом заполнения ВАХ СЭ $\eta = I_m V_m / I_{кз} V_{xx}$, где $I_m V_m$ – максимальная мощность выходного тока при заданных I_v и V_{xx}. Расчет показывает, что $V_m \approx V_n$, так что определение V_n и, соответственно, I_m очень важно для оптимизации электрических режимов эксплуатации СЭ.

Заключение. Таким образом, с учетом распределения потенциалов и токов в лицевом n^+-слое солнечных элементов n^+-p-типа получено выражение для их вольт-амперных характеристик в зависимости от параметров лицевого слоя. Проведенный анализ уравнений (4)–(8) позволил представить уравнение ВАХ СЭ в новой форме, более точно описывающей зависимость выходных параметров СЭ от R, а также от характеристик p-n-перехода. Показано, что при сопротивлении лицевого слоя $R > R_n$ (~4 Ом/см^2) ток короткого замыкания ($I_{кз}$) и коэффициент заполнения (η) уменьшаются обратно пропорционально $\sqrt{R}$, а при $R < R_n$ ВАХ практически не зависит от R. Сопротивление лицевого слоя солнечного элемента влияет на вольт-амперные характеристики. В условиях космоса деградация параметров СЭ происходит в значительной степени из-за возрастания сопротивления лицевого n^+-слоя, пересыщенного донорами в условиях облучения.

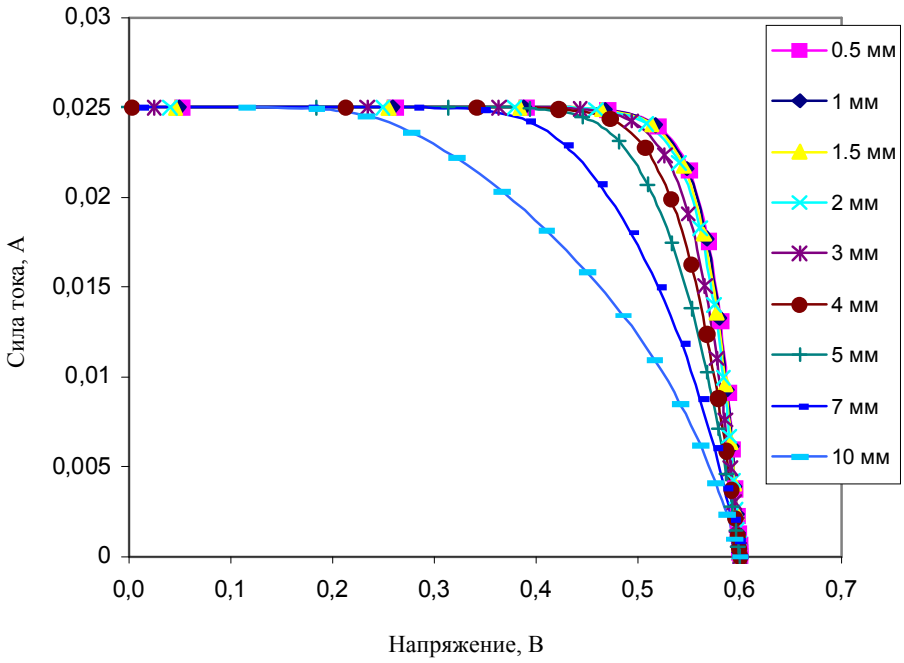


Рис. 1. Расчетные ВАХ для СЭ с $I_ф$ = 25 мА/см^2 и V_{xx} = 0,6 В

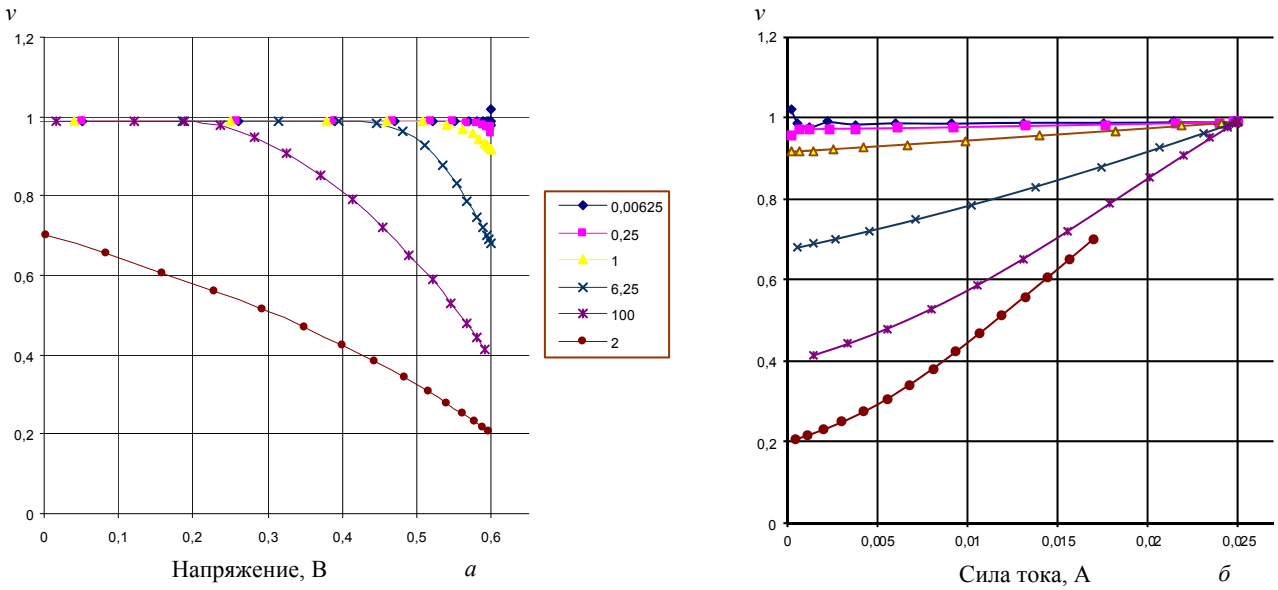


Рис. 2. Зависимость v от V (a) и I ($б$) для разных значений $R(l_1)$

Библиографические ссылки

1. Филачев А., Таубкин И., Тришенков М. Твердотельная электроника. М. : Физматкнига, 2007. 384 с.
2. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena theory, experiment, and applications. Elsevier Ltd, 1999. 206 p.
3. Clean electricity from photovoltaics / Edited by M. Archer, R. Hill. London : Imperial College Press, 2001. 868 p.
4. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley&Sons, 2003. 1179 p.
5. Markvart T., Castafier L. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Elsevier Ltd, 2003. 1015 p.
6. Байерс Т. 20 конструкций с солнечными элементами. М. : Мир, 1988. 197 с.
7. Мейтин М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы // Электроника-НТБ. 2000. № 6. С. 40–47.
8. Härkönen J. Processing of High Efficiency Silicon Solar Cells. Helsinki : Helsinki University of Technology, 2001. 106 p.
9. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2nd Edition. Wiley, 2010. 1162 p.

10. Würfel P. Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2010. 241 p.

11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М. : Мир, 1984. 456 с.

12. Колтун М. Солнечные элементы. М. : Наука, 1987. 192 с.

13. Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М. : Сов. радио, 1971. 248 с.

14. Фаренбрук А., Бьюб Р. Солнечные элементы (теория и эксперимент). М. : Энергоатомиздат, 1987. 280 с.

15. Nelson J. The Physics of Solar Cells. London : Imperial College Press, 2003. 384 p.

References

1. Filachev A., Taubkin I., Trishenkov M. *Tverdotelnaya elektronika* [Solid State Electronics]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2007, 384 p.

2. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena theory, experiment, and applications. Elsevier Ltd, 1999. 206 p.

3. Clean electricity from photovoltaics. Edited by Archer M., Hill R. London, Imperial College Press, 2001. 868 p.

4. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley&Sons, 2003, 1179 p.

5. Markvart T., Castafier L. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Elsevier Ltd, 2003. 1015 p.

6. Baiers T. *20 konstruktsii s solnechnimi elementami* [20 structures with solar cells]. Moscow, Mir Publ., 1988, 197 p.

7. Meitin M. [Photovoltaics: Materials, Technologies and Perspective]. *Electronika-NTB*. 2000, no. 6, p. 40–47 (In Russ.).

8. Härkönen J. Processing of High Efficiency Silicon Solar Cells. Helsinki, Helsinki University of Technology, 2001, 106 p.

9. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd Edition. Wiley, 2010, 1162 p.

10. Würfel P. Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010, 241 p.

11. Zi S. *Fizika poluprovodnikovikh priborov* [Physics of Semiconductor Devices]. Moscow, Mir Publ., 1984, 456 p.

12. Koltun M. *Solnechnye elementy* [Solar cells]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 192 p.

13. Vasiliev A., Landsman A. *Poluprovodnikovye preobrazovateli* [Semiconductor photovoltaics] Moscow, Sov. Radio Publ., 1971, 248 p.

14. Farenbruk A., Bube R. *Solnechnye elementy (teoria I eksperiment)* [Solar cells (theory and experiment)]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 280 p.

15. Nelson J. The Physics of Solar Cells. London: Imperial College Press, 2003, 384 p.

© Логинов Ю. Ю., Брильков А. В., Мозжерин А. В., 2015

УДК 629.7.036.74

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 193–197

ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

А. А. Мошняков[1, 2], М. В. Михайлов[1, 2*]

[1]АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30
[*]E-mail: maxmir2004@mail.ru

Использование электрореактивных плазменных двигателей для коррекции орбиты космических аппаратов обусловлено стремлением уменьшить массу двигательной установки за счет снижения расхода рабочего тела. В настоящее время электропитание нагревательных элементов двигательной установки осуществляется постоянным током из-за простоты его измерения и стабилизации. Поскольку требуется гальванически развязанное питание, то на выходе трансформатора устанавливается мощный низковольтный выпрямитель, значительно увеличивающий потери. Кроме того, низкое быстродействие диодов вызывает увеличение уровня помех трансформатора. Электропитание переменным стабилизированным током позволяет улучшить массогабаритные и энергетические показатели системы преобразования и управления, а также снизить уровень помех.

Основная проблема при работе со стабилизированным переменным током – изменение его формы в зависимости от сопротивления нагрузки, напряжения питания и длины кабелей, что затрудняет процесс измерения действующего значения и стабилизации тока. Есть несколько способов решения этой проблемы: использование датчика действующего значения тока, входного регулятора постоянного тока и нерегулируемого выходного инвертора, установка выходного L-фильтра. Наиболее перспективен первый из них. Однако в настоящее время из-за сложности реализации датчика эффективнее применение входного регулятора постоянного тока с нерегулируемым выходным инвертором и уменьшенным L-фильтром. Такая схема обеспечивает неизменную форму выходного тока независимо от входного напряжения и сопротивления нагрузки, а L-фильтр исключает влияние кабелей.

Исходя из этого, разработана модель устройства электропитания нагревателя катода на переменном токе. Приведены диаграммы её работы при крайних значениях напряжения питания, сопротивления нагрузки и индуктивности кабелей. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности реализации устройства с требуемыми выходными характеристиками.

Электропитание нагревательных элементов двигательной установки на базе электрореактивного плазменного двигателя переменным током – это перспективное направление улучшения массогабаритных и энергетических показателей как системы электропитания, так и двигательной установки в целом.

Ключевые слова: электрореактивный двигатель, система преобразования и управления, нагревательный элемент.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 193–197

ELECTRIC POWER SUPPLY OF HEATER ELEMENTS OF ELECTRIC PROPULSION THRUSTER BY REGULATED ALTERNATING CURRENT

A. A. Moshnyakov[1, 2], M. V. Mikhaylov[1, 2*]

[1]SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
[2]National research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
[*]E-mail: maxmir2004@mail.ru

Using of electric propulsion thrusters for space-craft’s orbit correction allow decreasing mass of electric propulsion system due to reduced propellant mass. At the moment using direct current in electric power supply of electric propulsion thruster’s heater elements is due to simple measuring and stabilization. On the transformer output has the

low-voltage power rectifier because galvanic isolation power supply is required. Using the low-voltage power rectifier is significantly increasing power loss. In addition, diode's slow response increases the noise level of transformer. Electric power supply by regulated alternating current improving dimensions, mass and electric power characteristics of power processing unit is used.

Cardinal problem in work with regulated alternating current is changing current waveform which depends on load resistance, supply voltage and length of cables. These changes will make measuring root-mean-square value of current difficult as well as current stabilization. We have several ways of solution of these problems: sensing unit of root-mean-square value of current, output L-filter, input regulator of DC current and unregulated output inverter. Most long-term way of solution is using sensing unit of root-mean-square value of current. But at the moment effective using is input regulator of DC current with unregulated output inverter and L-filter. That design of power supply ensuring fixed waveform of output current independent of input voltage and load resistance. L-filter circuit removes influence of cables.

In this paper SPICE-model of electric power supply (operating on alternating current) of cathode heater is presented. Also time diagrams of operating SPICE-model limit values of voltage supply, load resistance and inductance of cables are presented. Submitted data allow achieving practical realization of this power supply.

Using of electric power supply of heater elements of electric propulsion thruster by regulated alternating current is long-term aim, which improving mass and electric power characteristics of electric propulsion system.

Keywords: Hall-effect thruster, power processing init, heater element.

Введение. Широкое распространение электрореактивных плазменных двигателей, используемых для коррекции орбиты космического аппарата, обусловлено стремлением уменьшить массу двигательной установки за счет снижения расхода рабочего тела по сравнению с химическими реактивными двигателями [1; 2]. Неотъемлемой частью любой двигательной установки на основе электрореактивного плазменного двигателя является система преобразования и управления (СПУ), представляющая собой набор преобразователей электрической энергии [3–5]. В состав СПУ входит минимум пять источников питания: разряда промежутка анод–катод, нагревателя катода, электрода поджига, термодросселя и клапанов. Нагреватель катода и термодроссель представляют собой металлические элементы, нагреваемые током. В настоящее время их нагрев осуществляется постоянным током из-за простоты его измерения и стабилизации. Поскольку требуется гальванически развязанное питание, то на выходе трансформатора устанавливается мощный низковольтный выпрямитель, значительно увеличивающий потери. Кроме того, низкое быстродействие диодов вызывает увеличение уровня помех трансформатора и снижает надежность СПУ в целом. Устранить указанные недостатки можно с помощью электропитания нагревательных элементов двигательной установки переменным током. Такой способ применялся в первых СПУ [6; 7], однако тогда не требовалась стабилизация тока, что значительно упрощало задачу [8].

Основная проблема при работе со стабилизированным переменным током – изменение его скважности и гармонического спектра, вызывающего изменение формы в зависимости от сопротивления нагрузки, напряжения питания и длины кабелей. Отсюда, как следствие, сложность поддержания его действующего значения в заданных пределах [9; 10].

Способы решения. Есть несколько способов решения этой проблемы:

– использование датчика действующего значения тока;

– установка выходного *L*-фильтра [11];

– применение входного регулятора постоянного тока и нерегулируемого выходного инвертора.

Датчик действующего значения тока представляет собой сложное электронное устройство [12], преобразующее переменный входной сигнал в постоянное выходное напряжение, эквивалентное действующему значению тока, которое подается на вход системы управления. Его недостатки – сложная схемотехническая реализация и невысокая точность, в большинстве случаев он предназначен для работы с синусоидальным током, однако способ, основанный на использовании этого устройства, перспективен вследствие быстрого развития электронной и измерительной техники.

Выходной *L*-фильтр – это дроссель, индуктивность которого много больше индуктивности кабелей, что позволяет уменьшить изменение гармонического спектра тока, вызванное коммутацией силовых транзисторов инвертора, и компенсировать индуктивность кабелей. Однако амплитуда и скважность импульсов будут изменяться в зависимости от сопротивления нагрузки и напряжения питания, что затруднит определение действующего значения.

Входной регулятор постоянного тока в сочетании с нерегулируемым инвертором обеспечивает неизменную прямоугольную форму тока независимо от входного напряжения и сопротивления нагрузки. Подключив к выходу инвертора *L*-фильтр, можно исключить влияние кабелей, при этом форма тока станет экспоненциальной. Таким образом, при воздействии всех дестабилизирующих факторов форма и амплитуда тока меняются незначительно.

Модель устройства электропитания нагревателя катода. Для исследования электрических процессов, протекающих в схеме формирователя переменного тока нагревателя катода, разработана модель в среде Micro-Cap 9 [13; 14] (рис. 1). Она включает в себя входной источник питания V1 напряжением 80–120 В с внутренним сопротивлением R1, преобразователь постоянного напряжения понижающего типа (VT1, L4, VD1, C1, V6), мостовой инвертор, трансформатор (K1, L1, L2), выходной фильтр L5 и нагрузку (L3, R11).

На первом этапе исследования транзистор VT1 был постоянно открыт при помощи источника V6, а регулирование тока осуществлялось инвертором (VT2–VT5) путем изменения скважности импульсов напряжения источников (V2–V5). Выходной фильтр L5 отсутствовал. В результате моделирования (рис. 2) видно, что при неизменном действующем значении тока его форма и амплитуда существенно отличаются, а следовательно, погрешность измерения будет высокой.

На рис. 3 показаны результаты моделирования, когда стабилизация тока осуществлялась ключом VT1 при помощи изменения скважности импульсов напряжения источника V6. Скважность импульсов напряжения источников V2–V5 в этом случае равнялась 2 и не зависела от входного напряжения источника V1, сопротивления и индуктивности нагрузки (R11, L3).

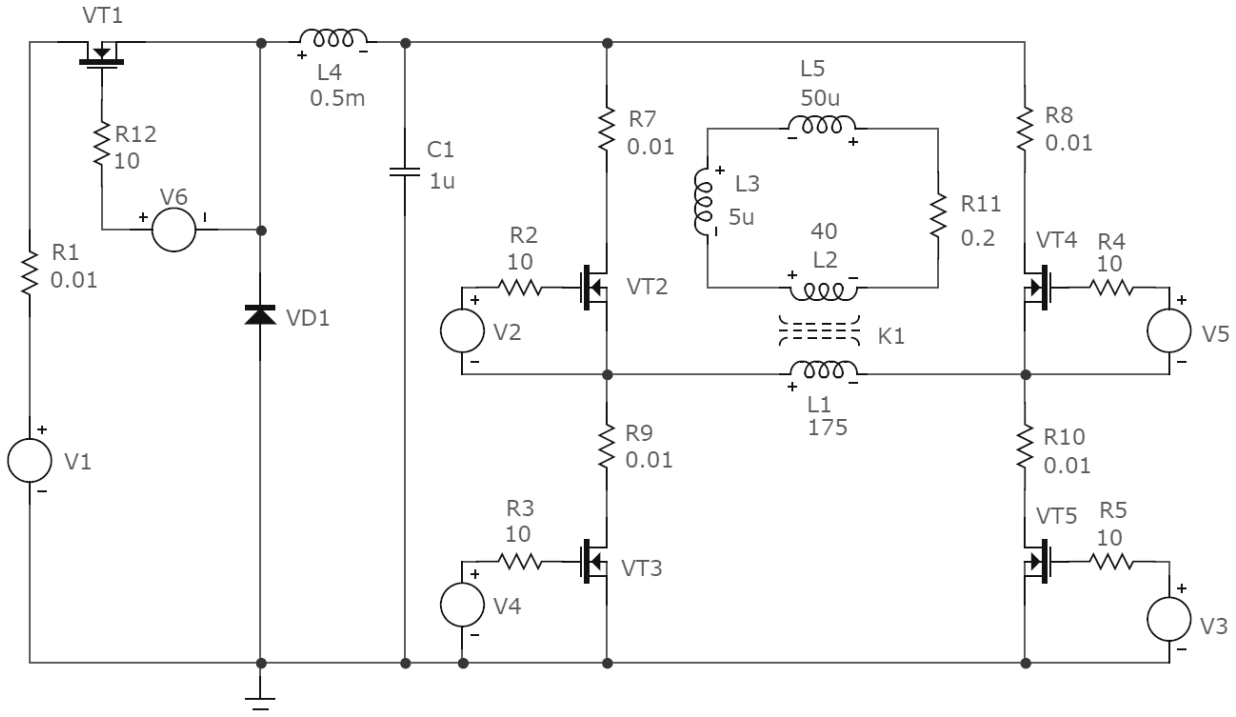
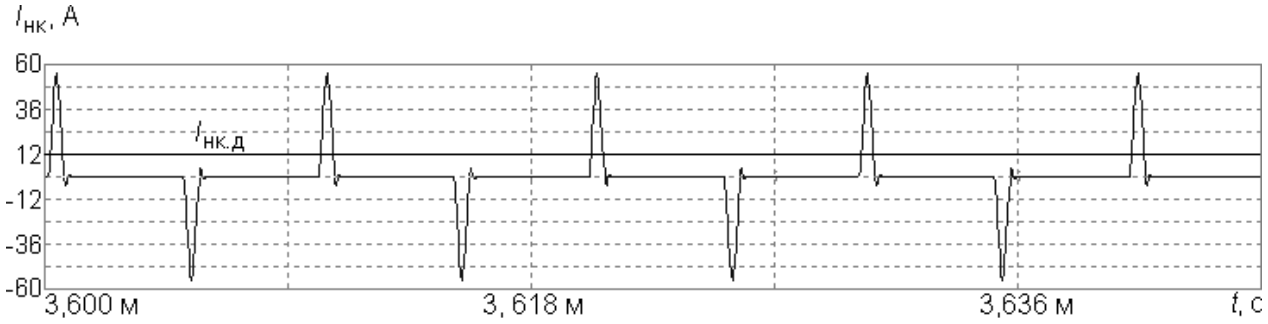
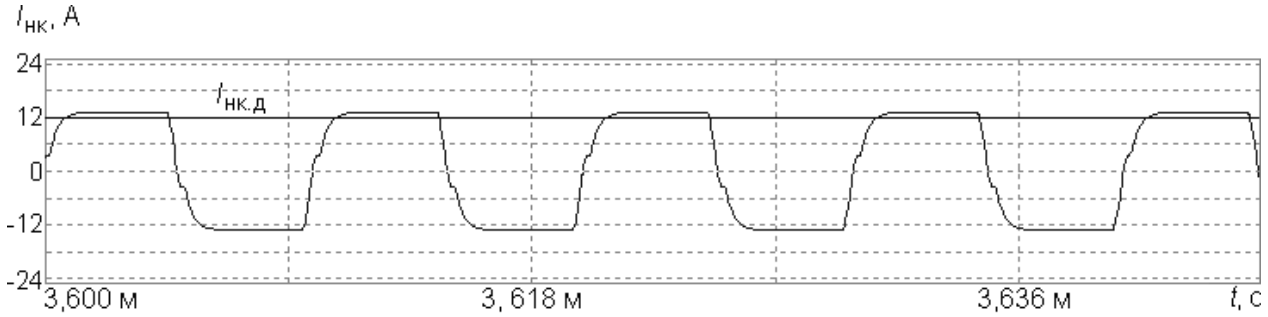


Рис. 1. Модель схемы формирователя переменного тока для нагревателя катода

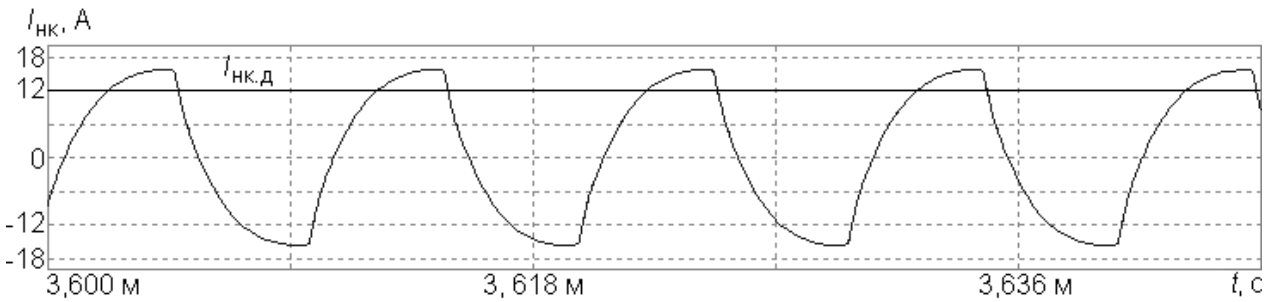


а

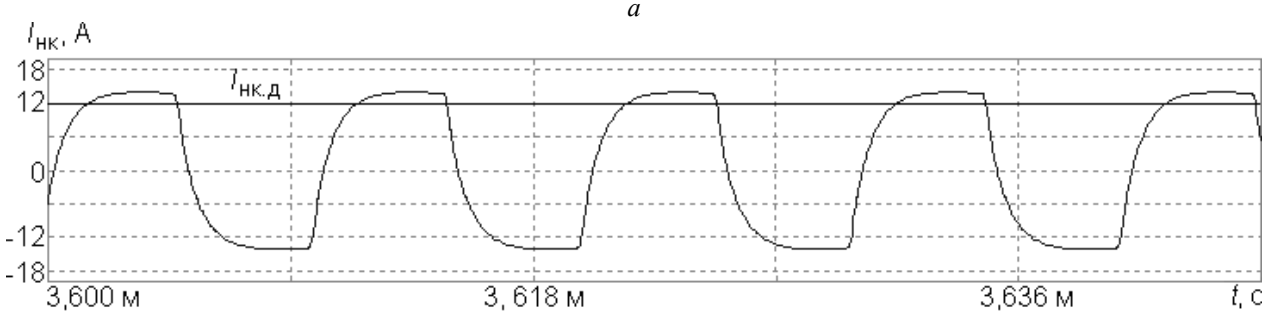


б

Рис. 2. Ток накала катода $I_{нк}$:
а – $R_{11} = 0,2$ Ом, $L_3 = 5$ мкГн, $U_{V1} = 120$ В ; *б* – $R_{11} = 0,7$ Ом, $L_3 = 50$ мкГн, $U_{V1} = 80$ В



а



б

Рис. 3. Ток накала катода $I_{нк}$ с учетом L-фильтра:
а – $R_{11} = 0,2$ Ом, $L_3 = 5$ мкГн, $U_{V1} = 120$ В ; *б* – $R_{11} = 0,7$ Ом, $L_3 = 50$ мкГн, $U_{V1} = 80$ В

При этом форма тока и амплитуда изменяются значительно меньше, чем в первом случае, следовательно, измерение и стабилизация такого тока могут выполняться со значительно большей точностью.

Поскольку регулятор расположен на входной (высоковольтной) стороне, то энергетические и массогабаритные характеристики полученного устройства заметно лучше, чем у используемых источников питания с выходным низковольтным выпрямителем [15], а погрешность измерения переменного тока неизменной формы можно дополнительно снизить путем компенсации статической ошибки.

Заключение. Электропитание нагревательных элементов электрореактивного плазменного двигателя переменным стабилизированным током – это перспективное направление развития СПУ, позволяющее улучшить массогабаритные и энергетические показатели как источников питания, так и двигательной установки в целом. Для увеличения точности стабилизации целесообразно удерживать форму тока неизменной при любых сочетаниях напряжения питания, сопротивления нагрузки и индуктивности кабелей.

Библиографические ссылки

1. Lazurenko A., Mazouffre S., Prioul M. Recent Advances in Dual-mode Hall Effect Thruster Development // Recent Advances in Space Technologies. 2005. P. 339–343.

2. Burkhardt H., Sippel M., Krulle G. Evaluation of Propulsion Systems for Satellite End-of-Life De-orbiting // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2002.

3. Михайлов М. В. Устройство запуска и электропитания стационарного плазменного двигателя : дис. … канд. техн. наук. Томск, 2006.

4. Choo Won-Gyo, Jeong Yun-hwang. The Development of 260W Power Processing Units for Hall Effect Propulsion System // The 32nd Intern. Electric Propulsion Conf. 2011.

5. Bourguignon E., Fraselle S., Scalais T. Power Processing Unit Activities at Thales Alenia Space ETCA // The 32nd Intern. Electric Propulsion Conf. 2011.

6. А. с. 752664 СССР. Преобразователь напряжения / М. М. Глибицкий [и др.] (СССР). № 2547576/24–07 ; заявл. 21.11.77 ; опубл. 30.07.80, Бюл. № 28. 3 с. : ил.

7. Глибицкий М. М. Системы питания и управления электрическими ракетными двигателями. М. : Машиностроение, 1981. 136 с.

8. Пат. 2298194 Российская Федерация. Способ измерения действующего значения напряжения в электрических цепях переменного тока / Кудашов А. В., Митохин В. Д., Чернецов В. И. № 2006108101/28 ; заявл. 15.03.06 ; опубл. 27.04.07.

9. Метод измерения действующего значения с помощью МК [Электронный ресурс]. URL: http://habrahabr.ru/post/193022 (дата обращения: 27.10.14).

10. Действующие значения напряжения и тока. Возможно ли их измерить методами аналоговой техники? [Электронный ресурс]. URL: http://www.tca.ru/list_of_articles/detail.php?ID=363 (дата обращения: 27.10.14).

11. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2005. 632 с.

12. Макита Йо, Ролье Стефан. Датчики тока с дополнительными интеллектуальными функциями // Силовая электроника. 2014. № 1. С. 40–43.

13. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М. : Горячая линия–Телеком, 2007. 464 с.

14. Михайлов М. В., Казанцев Ю. М. Интегрированная модель каналов электропитания СПД // Известия ТПУ. 2006. № 4, т. 309. С. 149–153.

15. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. М. : Энергоатомиздат, 1992. 296 с.

References

1. Lazurenko A., Mazouffre S., Prioul M. [Recent Advances in Dual-mode Hall Effect Thruster Development]. *Recent Advances in Space Technologies*. 2005, p. 339–343.

2. Burkhardt H., Sippel M., Krulle G. [Evaluation of Propulsion Systems for Satellite End-of-Life De-orbiting]. *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 2002.

3. Mikhaylov M. V. *Ustroystvo zapuska i elektropitania stactsionarnogo plazmennogo dvigatelya*. Dis. kand. tekhn. nauk. [The device start-up and power stationary plasma thruster. Dis. Cand. Tehn. Sciences]. Tomsk, 2006.

4. Choo Won-Gyo, Jeong Yun-hwang [The Development of 260W Power Processing Units for Hall Effect Propulsion System]. *The 32nd International Electric Propulsion Conference*. 2011.

5. Bourguignon E., Fraselle S., Scalais T. Power Processing Unit Activities at Thales Alenia Space ETCA. *The 32nd International Electric Propulsion Conference*. 2011.

6. Glibitskiy M. M., Yriev A. N. et al. *Preobrazovatel' napryazheniya* [Supply converter]. Patent USSR, no. 752664, 1980.

7. Glibitskiy M. M. *Sistemy pitaniya i upravleniya elektricheskimi raketnymi dvigatelyami.* [Power systems management and electric propulsion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, p. 136.

8. Kudashov A. V., Mitokhin V. D., Chernetsov V. I. *Sposob izmereniya deystvuyushchego znacheniya napryazheniya v elektricheskikh tsepyakh peremennogo toka* [A method for measuring the rms value of the voltage in electrical circuits, AC]. Patent RF, no. 2298194, 2007.

9. *Metod izmereniya deystvuyushchego znacheniya s pomoshch'yu MK* [Method of measuring the current values by MK]. Available at: http://habrahabr.ru/post/193022 (accessed 27.10.14).

10. *Deystvuyushchie znacheniya napryazheniya i toka. Vozmozhno li ikh izmerit' metodami analogovoy tekhniki?* [RMS values of voltage and current. Can they be measured by analog technology?]. Available at: http://www.tca.ru/list_of_articles/detail.php?ID=363 (accessed 27.10.14).

11. Meleshin V. I. *Tranzistornaya preobrazovatelnaya tekhnika* [Transistor converters.]. 2005, p. 632.

12. Makita Yo, Rolye Stefan. [Current sensors with additional smart features]. *Silovaya elektronika*. 2014, no. 1 (In Russ.). Available at: http://www.power-e.ru/pre_40_01_14_IsencFncts.php. (accessed 27.10.14).

13. Amelina M. A., Amelin C. A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniay Micro-Cap 8*. [Circuit simulation program Micro-Cap 8]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007, 464 p.

14. Mikhaylov M. V., Kazantcev Y. M. [Integririvannaya model kanalov elektropitaniya SPD]. *Izvesiya TPU*. 2006, vol. 309, no. 4, p. 149–153 (In Russ.).

15. Rozanov Y. K. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, p. 296.

© Мошняков А. А., Михайлов М. В., 2015

УДК 629.785

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 198–206

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И СХЕМЫ ПОЛЁТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ИНТЕРГЕЛИО-ЗОНД»

И. В. Платов[1*], А. В. Симонов[1], М. С. Константинов[2]

[1]Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина
Российская Федерация, 141400, г. Химки Московской области, ул. Ленинградская, 24
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4
[*]E-mail: aia@laspace.ru

Статья посвящена особенностям разработки перспективного российского космического аппарата (КА) «Интергелио-Зонд», на котором в качестве маршевой используется электроракетная двигательная установка (ЭРДУ). Он должен исследовать околосолнечное пространство с близких расстояний (60–70 радиусов Солнца) и внеэклиптических наклонений. Проект должен быть разработан, исходя из запуска космического аппарата с космодрома Байконур при помощи ракеты-носителя «Союз-2» и разгонного блока «Фрегат». При разработке схемы полёта предполагается, что через 5 лет аппарат должен выйти на орбиту с максимальным наклонением. Его траектория формируется с помощью гравитационных маневров у Земли и Венеры. Задачей первого этапа схемы полёта является максимизация асимптотической скорости подлёта к Венере. Он условно назван эклиптическим, так как траектория КА располагается практически в плоскости эклиптики. На втором, «внеэклиптическом», этапе наклонение орбиты увеличивается за счёт гравманевров у Венеры, причём для осуществления последующей встречи орбита космического аппарата должна быть в так называемом резонансе с орбитой Венеры, т. е. периоды их орбит должны относиться как целочисленные дроби вида 1/1, 2/3, 3/4 и т. д. Для минимизации длительности формирования рабочей орбиты необходимо использовать орбитальные резонансы малого порядка.

Рассмотрены три варианта оснащения КА «Интергелио-Зонд» двигательными установками (ДУ): один вариант с «химической» ДУ и два варианта с ЭРДУ на базе RIT-22 и СПД-140Д. Приведены описания этих вариантов конструкции. В соответствии с ними разработаны схемы полёта, позволяющие доставить КА за время активного существования на гелиоцентрическую орбиту с требуемыми параметрами. Представлены основные характеристики траекторий.

Комбинированная ДУ позволяет реализовать разработанную траекторию и при этом обеспечить штатную работу целевой аппаратуры, осуществляя коррекцию, ориентацию и стабилизацию на однокомпонентной ДУ. Представленная схема комбинированной ДУ с применением двигателей производства ОКБ «Факел» позволяет достичь заданных параметров орбиты вокруг Солнца и провести комплекс экспериментов в течение заданного срока активного существования КА «Интергелио-Зонд».

Ключевые слова: космический аппарат, электроракетная двигательная установка, схема полёта, межпланетный перелет, Солнце.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 198–206

FEATURES OF DEVELOPMENT OF THE COMBINED IMPELLENT INSTALLATION AND THE CIRCUIT OF FLIGHT OF THE SPACECRAFT «INTERGELIO-PROBE»

I. V. Platov[1*], A. V. Simonov[1], M. S. Konstantinov[2]

[1]Research and manufacturing association named after S. A. Lavochkin
24, Leningradskaya Str., Khimki, Moscow region, 141400, Russian Federation
[2]Moscow Aviation Institute
4, Volokolamskoye Av., Moscow, 125993, Russian Federation
[*]E-mail: aia@laspace.ru

The article concerns the peculiarities of development of the prospective Russian spacecraft (SC) "Intergelio probe", with using electric propulsion system as a sustainer. It should explore space around the Sun at close range (60–70 solar radii) and nonecliptic inclinations. The project has to be developed, based on the launch of the spacecraft from the Baikonur Cosmodrome with using "Soyuz-2" launcher and the "Fregat" upper stage. In developing the scheme

of flight is assumed that after 5 years the SC has to be injected into orbit with a maximum inclination. Its trajectory is generated using gravity assist from Earth and Venus. The objective of the first phase of the scheme is to maximize flight asymptotic rate approaching the Venus. It is conventionally called "ecliptic", as the spacecraft trajectory is almost in the plane of the ecliptic. On the second, "nonecliptic", stage orbital inclination increased due gravity assists at Venus, and for the next meeting the orbit of the spacecraft have to be in the so-called "resonance" with the orbit of Venus, i. e. periods of their orbits must be treated as an integer fraction of the form 1/1, 2/3, 3/4, etc. To minimize the formation of the duration of flight it is necessary to use the orbital resonances of small order.

The article discusses three versions of equipment SC "Intergelio-Probe" propulsion: one version with "chemical" engine and the two variants with EPS-based RIT-22 and SPD-140D. In the article the descriptions of these design options is showed. In accordance with these variants flight schemes were developed, allowing the spacecraft to deliver during the active existence of a heliocentric orbit with the required parameters. It is specified the main characteristics of the trajectories.

The combined propulsion allows realizing designed trajectory, while providing a full-time operation of science equipment, carrying out correction of orientation and stabilization in the single-component control. This scheme with application of propulsion engine, manufactured by Design Bureau "Fakel", allows reaching the required parameters of the orbit around the Sun and conducting complex experiments for a specified period of active existence of the SC "Intergelio-Probe".

Keywords: spacecraft, electric propulsion system, flight scheme, interplanetary transfer, Sun.

1. Введение

В физике Солнца и солнечно-земной физике остаётся нерешённым целый ряд проблем, таких как нагрев солнечной короны и ускорение солнечного ветра, триггерные механизмы наиболее мощных проявлений солнечной активности – вспышек и выбросов массы, механизмы генерации и распространения энергичных частиц на Солнце и в гелиосфере, механизм солнечного динамо и 11-летнего солнечного цикла и др. Все эти и многие другие нерешённые вопросы гелиофизики представляют общий астрофизический интерес, так как аналогичные процессы проходят на далёких звёздах, а их детальное изучение возможно только на ближайшей к нам звезде – Солнце. Практический интерес изучаемых проблем связан с воздействием Солнца на Землю и влиянием факторов космической погоды на различные сферы человеческой деятельности на Земле и в космосе.

Действующие солнечные космические миссии (SOHO, STEREO, SDO, Hinode и др.) и миссии прошлых лет (Yohkoh, КОРОНАС-Ф и др.) много дали для понимания того, как устроено Солнце и как оно работает, а также для изучения солнечно-земных связей. Дальнейшее продвижение в изучении происходящих на Солнце и в гелиосфере явлений и процессов связано с новыми наблюдениями и измерениями, способными дать необходимые данные для изучения. Дистанционные наблюдения Солнца с близких расстояний с высоким пространственным разрешением наряду с локальными измерениями вблизи Солнца, а также внеэлиптические наблюдения и измерения являются следующим шагом в стремлении узнать больше о Солнце и околосолнечном пространстве.

При реализации проекта «Интергелио-Зонд» предполагается, что космический аппарат (КА) сблизится с Солнцем до расстояний в 60–70 солнечных радиусов и будет постепенно наклонять плоскость своей орбиты к плоскости эклиптики, что позволит реализовать новые наблюдения и измерения, необходимые для решения научных задач и достижения основных целей миссии [1].

Проект должен быть разработан, исходя из запуска КА с Байконура с помощью ракеты-носителя (РН) «Союз-2» с разгонным блоком (РБ) «Фрегат» [2–5]. Срок активного существования аппарата должен превышать 5 лет.

2. Варианты конструкции КА

Для реализации поставленных задач в рамках эскизного проектирования были разработаны варианты исполнения космических аппаратов, представленные на рис. 1.

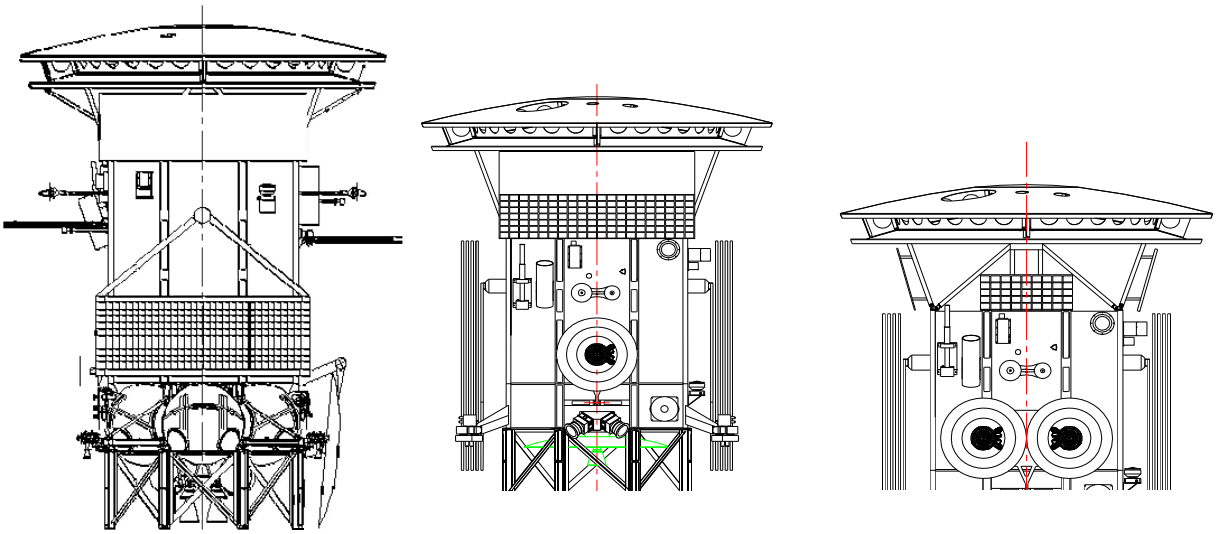
Вариант КА с двигательной установкой (ДУ) на двухкомпонентных жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) производства НИИМаш (г. Н. Салда) предполагал максимальное использование задела по ДУ перелётного модуля проектов «Фобос–Грунт» и «Луна–Глоб» [6; 7].

Конструкция ДУ на ЖРД выполнена виде моноблока, основой которого является блок баков, представляющий собой сварную конструкцию из четырёх сферических топливных баков с цилиндрическими проставками между ними, элементами для установки панелей заправки и агрегатов, ложементами крепления двух баллонов высокого давления объемом $25 \cdot 10^{-3}$ м^3 (25 л). Топливные баки имеют объём внутренней полости (0,252 ± 0,002) м^3 ((252 ± 2) л) каждый: два бака – для хранения горючего – несимметричного диметилгидразина и два бака – для окислителя – амилина.

На каждом баке крепятся: клапан магистральный, клапаны проверочные, дискретный сигнализатор уровня, пироклапан, фильтр, датчик давления, температурные датчики, электронагреватель с тремя управляющими термодатчиками. Каждый бак имеет два установочных кронштейна, с помощью которых он крепится к восьмиугольному каркасу.

К цилиндрическим проставкам блока баков приварены кронштейны для крепления панелей блоков клапанов, штанг блоков двигателей малой тяги и ферм блоков двигателей коррекции.

Блоки двигателей малой тяги устанавливаются на четырёх одинаковых штангах, выполненных из АМг6. На каждом кронштейне устанавливается по три двигателя малой тяги: два двигателя стабилизации 17Д58ЭФ и один двигатель 11Д457Ф.



1 *2* *3*

Рис. 1. Варианты исполнения КА: *1* – двигательная установка на жидкостных ракетных двигателях; *2* – электроракетная двигательная установка на основе RIT-22; *3* – электроракетная двигательная установка на основе СПД-140Д

Блок двигателей коррекции представляет собой сборку из четырёх двигателей 11Д458Ф на круговой плите, которая крепится к остальной конструкции фермой из углепластика. Отвод тепла от работающих двигателей осуществляется тепловым аккумулятором с последующим сбросом через тепловую трубу на радиатор, закреплённый с помощью кронштейна на плите двигательного блока коррекции.

Монтаж топливных и газовых магистралей выполнен по внешней поверхности баков и элементов конструкции ДУ.

В соответствии с тактико-техническими требованиями необходимо было рассмотреть применение вариантов электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) на основе стационарного плазменного двигателя СПД-140Д разработки ОКБ «Факел» [8; 9] и высокочастотного ионного двигателя RIT-22 разработки фирмы Astrium концерна EADS [10; 11].

Несущей конструкцией для монтажа ДУ на КА служит корпус в форме параллелепипеда в виде жёсткой рамы, обшитой сотопанелями.

Конструктивно ЭРДУ состоит из блока хранения ксенона (БХК) и электроракетного двигательного модуля (ЭРДМ) [12]. БХК включает в себя два композитных бака для хранения рабочего тела, расположенных в нижней части параллелепипеда. Баки имеют цилиндрическую форму и крепятся к несущей конструкции кронштейнами. В качестве рабочего тела используется ксенон высокой чистоты.

В двигательном отсеке аппарата располагаются блоки клапанов, соединяющих ЭРДМ с БХК ЭРДУ, и блоки подачи ксенона. Двигательные блоки расположены на боковых стенках аппарата, свободных от приводов солнечных батарей.

Состояние параметров работоспособности ДУ оценивается при помощи датчиков температуры и давления. Блоки соединены в соответствии с КД кабелями и трубопроводами.

Коррекцию КА предполагается осуществлять при помощи четырёх стационарных плазменных двигателей СПД-140Д или двух высокочастотных ионных двигателей RIT-22. При этом работа ЭРДУ в маршевом режиме предусматривает одновременную работу пары двигателей СПД-140Д или одного RIT-22.

ЭРДМ на основе СПД-140Д включает в себя четыре двигателя с модулями газораспределения и механизм ориентации двигателя, который позволяет менять и корректировать вектор тяги двигателя.

ЭРДУ, независимо от исполнения, будет обеспечивать маршевый режим перемещения КА. Предусматривается также наличие однокомпонентной ДУ системы ориентации и стабилизации (СОиС), которая позволяет осуществлять ориентацию и стабилизацию, а также коррекцию КА. Выбранная конструктивная схема имеет в качестве прототипа схему, представленную для ДУ «Навигатор», так как они близки по динамическим условиям и расходным характеристикам топливных систем. В состав ДУ входят следующие системы:

– система хранения и подачи газа наддува;

– система хранения и подачи рабочего тела (гидразин) к реактивным двигателям;

– двигатели коррекции;

– двигатели стабилизации;

– датчики давления и температуры (телеметрические и управляющие);

– элементы конструкции (кронштейны, трубопроводы и т. д.).

Двигатели коррекции и стабилизации задублированы. В каждом двигательном блоке имеется основной двигатель и резервный, который находится в «холодном» резерве, если работает основной двигатель, и наоборот. Блоки сгруппированы на четырёх кронштейнах, установленных на рёбрах прямоугольного отсека ДУ: два двигателя стабилизации К50-10.1

и один двигатель ТК5000М на каждом кронштейне. Данные двигатели, как и СПД-140Д, производства ОКБ «Факел».

Таким образом, речь идёт о создании комбинированной ДУ, которая в маршевом режиме реализует возможности ЭРДУ, при этом ориентацию, стабилизацию и разгрузку двигателей-маховиков, а также коррекции КА при работе комплекса целевой аппаратуры осуществляет ДУ СОиС.

3. Схемы полёта

Основная задача синтеза схемы полёта – определить гелиоцентрическую траекторию КА, минимальный радиус перигелия которой должен находиться на расстоянии 60–70 радиусов Солнца и должен быть достигнут за время, не превышающее проектный срок активного существования КА. Ниже представлены варианты траектории при старте с Земли в 2016–2017 гг.

Гелиоцентрическая траектория формируется ДУ КА и гравитационными манёврами (ГМ) у планет земной группы. Наклонение орбиты КА к плоскости эклиптики увеличивается за счёт последовательно совершаемых облётов Венеры. Для этого аппарат выводится на гелиоцентрическую орбиту, находящуюся в орбитальном резонансе m/k с Венерой. На такой орбите КА совершает k оборотов вокруг Солнца за время, которое нужно Венере, чтобы совершить m оборотов вокруг Солнца (орбитальный период Венеры примерно равен 224,7 суток). Для минимизации длительности формирования рабочей орбиты необходимо использовать орбитальные резонансы малого порядка. В процессе перелёта отдельные гравитационные манёвры могут использоваться для перевода КА из одного резонанса в другой с целью управления радиусом перигелия и наклонением орбиты КА [13; 14].

Схема полёта КА с ЖРДУ. Был рассмотрен вариант со следующей последовательностью гравитационных манёвров у планет: Венера–Земля–Земля–Венера–Венера–Венера. Первый участок гелиоцентрической траектории, включающий первый ГМ у Венеры и оба ГМ у Земли, предназначен для увеличения асимптотической скорости последующего подлёта к Венере. На втором участке КА встречается только с Венерой, постепенно уменьшая радиус перигелия до заданного значения и увеличивая наклонение до максимально возможного за время активного существования.

Основные характеристики этого варианта схемы полёта представлены в табл. 1, где используются следующие обозначения:

ΔT – длительность этапа полёта КА, сутки;

T – период орбиты КА, сутки;

ΔV – характеристическая скорость манёвра, км/с;

V^- – подлётная асимптотическая скорость, км/с;

γ – угол поворота гелиоцентрической скорости КА при ГМ, градусы;

r_π – радиус перицентра планетоцентрической орбиты при ГМ, км;

V^+ – отлётная асимптотическая скорость, км/с;

R_π – радиус перигелия сформированной орбиты КА, радиусы Солнца;

i – наклонение сформированной орбиты КА, градусы;

$N_П / N_{КА}$ – отношение периода орбиты облетаемой планеты (Земли или Венеры) к сформированному периоду орбиты КА.

Траектория гелиоцентрического участка полёта представлена на рис. 2.

Схема полёта КА с RIT-22. Схема полёта включает в себя участок выведения на отлётную траекторию с помощью РН «Союз-2» и РБ «Фрегат», отделение КА и дальнейший перелёт по гелиоцентрической траектории с использованием ЭРДУ и последовательности гравитационных манёвров у Земли и Венеры [15]. Первый гравитационный манёвр осуществляется у Земли, в результате чего КА переводится на быструю траекторию перелёта к Венере с временем перелёта 53,5 суток. Второй гравитационный манёвр обеспечивает перевод КА на гелиоцентрическую орбиту, находящуюся в орбитальном резонансе 4:3 с Венерой (за 4 оборота КА вокруг Солнца Венера совершает 3 оборота). После этого гравитационного манёвра обеспечивается требуемый радиус перигелия в диапазоне 60–70 RS. Перед следующим гравитационным манёвром у Венеры КА совершает 4 пролета перигелия. Дальнейшие гравитационные манёвры производятся у Венеры и используются для увеличения наклонения гелиоцентрической орбиты КА, при этом радиус перигелия повышается до 88–114 RS. В результате третьего гравитационного манёвра КА переводится на гелиоцентрическую орбиту с периодом, равным орбитальному периоду Венеры. Четвертый гравитационный манёвр сохраняет период орбиты КА, а после пятого гравитационного манёвра, который имеет место примерно через 4,5 года после старта, КА переводится на нерезонансную орбиту с максимальным наклонением (24,6º–27,1°). Основные характеристики траектории представлены в табл. 2. Обозначения в ней аналогичны табл. 1.

ЭРДУ используется только на начальном гелиоцентрическом участке перелёта Земля–Земля для обеспечения условий выполнения первого гравитационного манёвра у Земли, включающих в себя увеличение подлётного гиперболического избытка скорости до более чем 8 км/с и обеспечение необходимого направления вектора подлётной скорости КА.

Таблица 1

Характеристики этапов полёта КА с ЖРДУ

Этап	Дата	ΔT	ΔV	V^-	γ	r_π	V^+	R_π	i	$N_П / N_{КА}$
Старт	03.01.2017	112,0	3,663	–	–		3,132	–	–	–
ГМ1	25.04.2017	261,2	0,082	5,062	83,9	7179	4,697	154,8	1,5	–
ГМ2	11.01.2018	365,5	0	7,802	61,4	6571	7,802	194,8	13,8	1/1
ГМ3	12.01.2019	134,0	0,052	7,802	60,0	6753	7,633	106,3	3,1	–
ГМ4	26.05.2019	224,7	0	12,733	27,1	7180	12,733	109,3	10,6	1/1
ГМ5	05.01.2020	674,1	0	12,733	27,1	7180	12,733	90,6	16,3	3/4
ГМ6	09.11.2021	–	0	12,733	27,1	7180	12,733	65,0	17,0	3/5

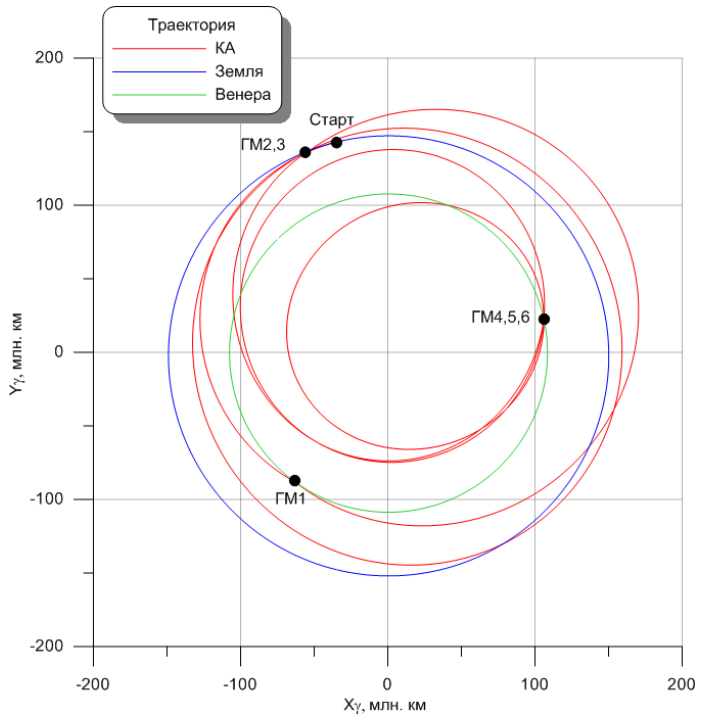


Рис. 2. Гелиоцентрическая траектория КА с ЖРДУ

Таблица 2

Основные характеристики траектории КА с RIT-22

Этап	Дата	ΔT	T	R_π	i	$N_П$ / $N_{КА}$
Старт	01.05.2017	485	–	–	0,12	–
ГМ1	29.08.2018	53,5	149,8	81,547	4,01	–
ГМ2	22.10.2018	674,1	168,5	67,288	10,26	4/3
ГМ3	26.08.2020	224,7	224,7	97,419	14,97	1/1
ГМ4	08.04.2021	224,7	224,7	113,858	20,80	1/1
ГМ5	19.11.2021	–	189,4	112,126	24,65	–

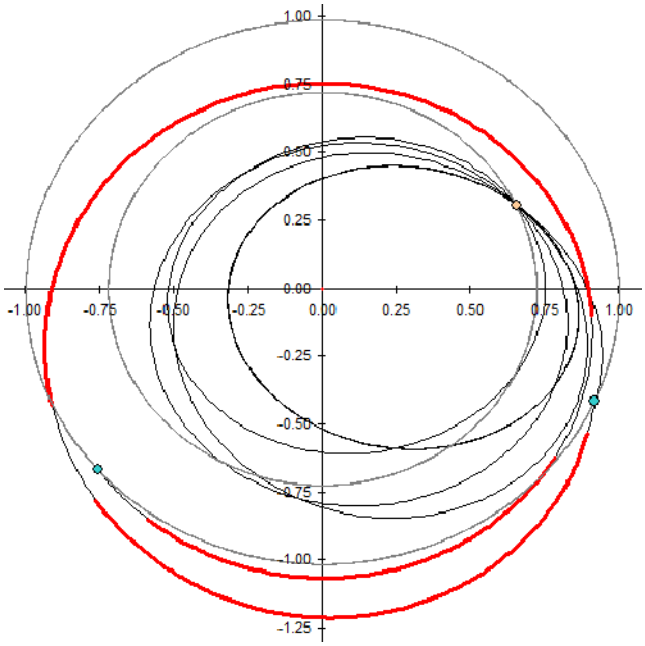


Рис. 3. Гелиоцентрическая траектория КА с RIT-22

Величина отлётного от Земли гиперболического избытка скорости выбрана равной 2900 м/с, при этом масса КА на отлётной траектории после отделения равна 1646,5 кг.

На рис. 3 приведена проекция гелиоцентрической траектории КА, оснащенного ЭРДУ с RIT-22, на плоскость *XY* гелиоцентрической эклиптической системы координат. Толстой линией обозначены участки работы ЭРДУ.

Схема полёта КА с СПД-140Д. Как и в случае применения RIT-22, ЭРДУ с СПД-40Д используется только на участке перелёта Земля–Земля. Использование ЭРДУ после гравитационного манёвра у Земли для формирования траектории КА не предполагается, хотя она может использоваться на последующих участках для дублирования функций ДУ СОиС в части проведения коррекций траектории.

Отлёт с Земли предполагается выполнить 9 июля 2017 года. КА должен быть выведен на гелиоцентрическую орбиту с асимптотической скоростью 1116 м/с. При этом масса КА после отделения от РБ «Фрегат» равна 2141 кг.

На траектории есть три активных участка (обеспечиваемые электроракетным двигателем) и два пассивных участка. Длительность активных участков равна 33, 98 и 166 суток. Длительность пассивных участков составляет 75 и 44 суток. Полученная траектория обеспечивает попадание в окрестность Земли с нужным вектором гиперболического избытка скорости. Его модуль равен 9143 м/с. Суммарное время работы ЭРДУ на перелёте составляет 297,8 суток. За это время тратится 349,8 кг ксенона. Таким образом, конечная масса КА равна 1791 кг.

Весь последующий маршрут реализуется за счёт использования трёх гравитационных манёвров у Венеры. Первые два из них обеспечивают перевод КА на резонансные с Венерой орбиты. Порядок резонанса выбран 2:3. Это значит, что после первого и второго гравитационных манёвров у Венеры гелиоцентрическая орбита КА имеет период, равный 2/3 периода орбиты Венеры. Это позволяет вывести КА на такие гелиоцентрические орбиты, чтобы после осуществления трёх оборотов вокруг Солнца (за время 449,4 суток) КА опять встречался с Венерой. Таким образом, до последнего (третьего) гравитационного манёвра у Венеры КА сделает 6 витков относительно Солнца, шесть раз будет проходить перигелий орбиты (его радиус находится в диапазоне 50–56 радиусов Солнца), наблюдая Солнце с достаточно малого расстояния.

Последний (третий) гравитационный манёвр у Венеры позволяет перейти КА на гелиоцентрическую орбиту с относительно большим наклонением (более 20 градусов). Период обращения на этой орбите равен 149 суток. Предполагается, что на такой орбите КА может проводить исследования как минимум на трёх витках (в течение почти 450 суток). С учётом времени полёта по маршруту Земля–Земля–Венера полное время полёта КА равно примерно пяти годам. За это время КА 9 раз проходит область перигелия орбиты и находится на удалении от Солнца, равном 50–65 радиусов Солнца.

Основные характеристики траектории представлены в табл. 3. Обозначения в ней аналогичны табл. 1.

Вариант ЭРДУ и схема полёта, принятые для рабочего проектирования. По результатам эскизного проекта принято решение о создании на последующих этапах разработки КА «Интергелио-Зонд» ДУ в комбинированном виде с применением двигателей производства ОКБ «Факел». При этом количество двигательных блоков с СПД-140Д сократилось до двух и предполагается одновременная работа только одного двигателя. Также была пересчитана схема полёта на новую дату старта с учётом корректировки Федеральной космической программы России. Была изменена последовательность орбитальных резонансов с Венерой для достижения большего наклонения к плоскости эклиптики.

Отлёт с Земли предполагается выполнить 18 апреля 2022 года. КА должен быть выведен на гелиоцентрическую орбиту с асимптотической скоростью 1950 м/с. При этом масса КА после отделения от РБ «Фрегат» равна 1827 кг.

На рис. 4 показана проекция траектории Земля – Земля – Венера на плоскость эклиптики. Активные участки траектории КА выделены жирными линиями, стрелками обозначено направление тяги ЭРДУ. Пассивные участки показаны тонкими линиями. Точками обозначены орбиты Земли и Венеры.

Видно, что три небольших пассивных участка разделены двумя значительными по длительности активными участками. Первый пассивный участок имеет продолжительность 70,67 суток. Первый активный участок следует за пассивным участком и продолжается до 245,29 суток полёта. Второй пассивный участок имеет продолжительность 26,70 суток. Второй активный участок продолжается 135,11 суток. Последний пассивный участок продолжается 21,74 суток. Суммарное время работы ЭРДУ на перелёте оказывается равным 309,74 суток (7434 ч).

Таблица 3

Основные характеристики траектории КА с СПД-140Д этапа эскизного проектирования

Этап	Дата	ΔT	T	R_π	i	$N_П$ / $N_{КА}$
Старт	09.07.2017	417,2	–	–	0,01	–
ГМ1	30.08.2018	49,5	–	–	4,01	–
ГМ2	19.10.2018	449,396	149,799	50,548	4,89	2/3
ГМ3	11.01.2020	449,396	149,799	55,792	14,45	2/3
ГМ4	05.04.2021	–	149,413	64,629	22,07	–

Эклиптическая фаза полёта КА предназначена для формирования гелиоцентрической траектории с достаточно малым радиусом перигелия (60–70 радиусов Солнца) и для осуществления одного или нескольких пролётов КА на таком удалении от Солнца. Такая рабочая орбита реализуется после первого гравитационного манёвра у Венеры. Последующие гравитационные манёвры у Венеры выполняются так, чтобы обеспечить увеличение наклонения рабочих гелиоцентрических орбит. Наклонение во внеэклиптической фазе увеличивается исключительно за счёт последовательно совершаемых гравитационных манёвров у Венеры. В номинальном случае ДУ СОиС на этой фазе используется только для коррекции траектории и, при необходимости, для решения задач управления ориентацией (разгрузки кинетического момента управляющих маховиков).

Рассматривается возможность использования орбитальных резонансов 1:1 и 4:3 орбит КА и Венеры. Гравитационные манёвры используются для перевода КА из одного резонанса в другой с целью изменения радиуса перигелия и наклонения. В результате последнего гравитационного манёвра у Венеры, аппарат переводится на нерезонансную гелиоцентрическую орбиту с максимально возможным наклонением.

На рис. 5 показана проекция на плоскость эклиптики системы исследуемых рабочих орбит. Положение Солнца отмечено кружком. Положение Венеры в моменты гравитационных манёвров у неё отмечено треугольником. Орбита Венеры показана точками. Первая рабочая орбита показана пунктирной линией. У этой орбиты самый маленький радиус перигелия (она ближе всего расположена к Солнцу). Вторая рабочая орбита показана штрихпунктирной тонкой линией. Третья рабочая орбита показана сплошной линией. Четвёртая рабочая орбита показана жирной пунктирной линией. Наконец, пятая рабочая орбита показана штрихпунктирной жирной линией.

Основные характеристики траектории представлены в табл. 4. Обозначения в ней аналогичны табл. 1.

Заключение

1. В статье рассмотрены три варианта оснащения КА проекта «Интергелио-Зонд» двигательными установками: один вариант с «химической» ДУ и два варианта с ЭРДУ на базе RIT-22 и СПД-140Д. Приведены описания вариантов конструкции.

2. Для этих вариантов разработаны схемы полёта, позволяющие доставить КА за время активного существования на гелиоцентрическую орбиту с радиусом перигелия 60–70 радиусов Солнца и наклонением 25–30 градусов к плоскости эклиптики. Представлены основные характеристики траекторий.

3. Комбинированная ДУ позволяет достичь заданного угла наклонения, при этом обеспечить штатную работу целевой аппаратуры, осуществляя коррекцию, ориентацию и стабилизацию на однокомпонентной ДУ.

4. Представленная схема комбинированной ДУ с применением двигателей производства ОКБ «Факел» позволяет достичь заданных параметров орбиты Солнца и провести комплекс экспериментов в течение заданного срока активного существования КА «Интергелио-Зонд».

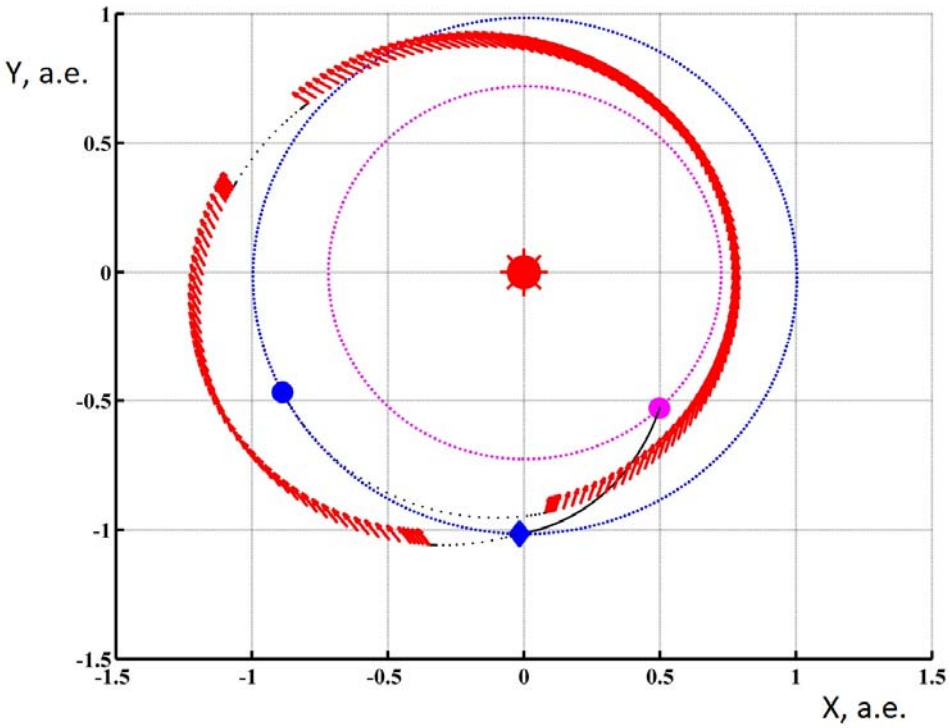


Рис. 4. Проекция траектории гелиоцентрического перелёта Земля–Земля–Венера на плоскость эклиптики

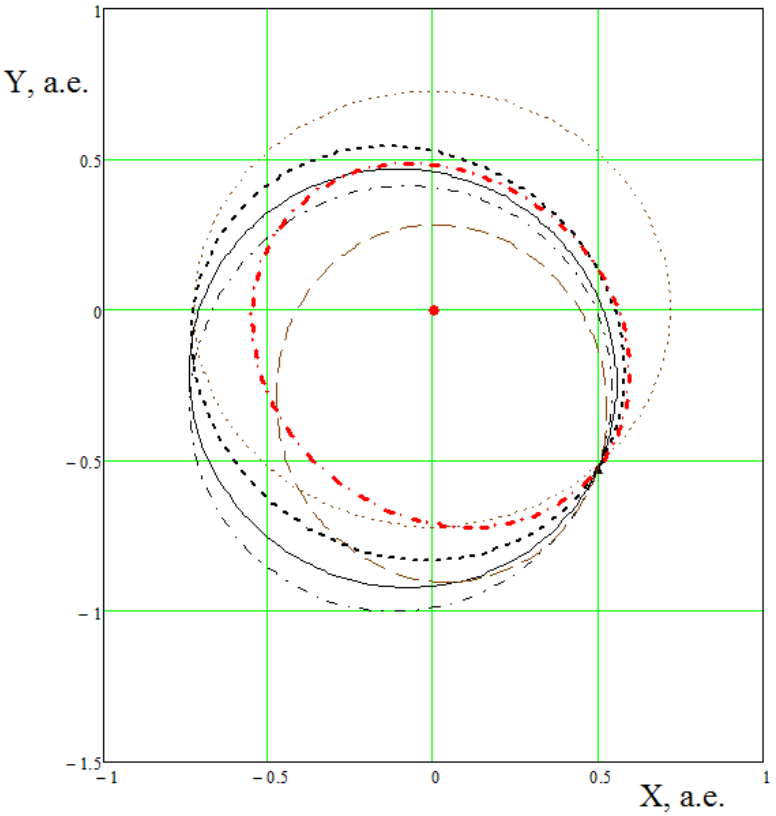


Рис. 5. Проекция на плоскость эклиптики системы пяти рабочих орбит

Таблица 4

Основные характеристики траектории КА с СПД-140Д этапа рабочего проектирования

Этап	Дата	ΔT	T	R_{π}	i	$N_{П} / N_{КА}$
Старт	18.04.2022	428,8	–	–	0,05	–
ГМ1	21.06.2023	49,1	–	–	4,57	–
ГМ2	09.08.2023	674,094	224,697	83,660	12,24	1/1
ГМ3	13.06.2025	449,396	168,523	66,400	17,75	4/3
ГМ4	05.09.2026	224,698	224,697	96,710	21,43	1/1
ГМ5	18.04.2027	224,698	224,697	112,995	26,79	1/1
ГМ6	29.11.2027	–	189,255	110,197	30,53	–

Библиографические ссылки

1. Кузнецов В. Д. Научные задачи проекта «Интергелиозонд» // Проект Интергелиозонд. Труды рабочего совещания. М., 2012. С. 5–14.

2. Асюшкин В. А., Викуленков В. П., Ишин С. В. Итоги создания и начальных этапов эксплуатации межорбитальных космических буксиров типа «Фрегат» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 3–9.

3. Баллистическое обеспечение разработки и полетов межорбитального космического буксира «Фрегат» / И. М. Морской [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 10–15.

4. Система управления межорбитального космического буксира «Фрегат» / В. В. Морозов [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 16–25.

5. Александров Л. Г., Кузьмин О. А., Макаров В. П. Двигательная установка реактивной системы управления межорбитальным космическим буксиром «Фрегат» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 47–49.

6. Ефанов В. В., Мартынов М. Б., Пичхадзе К. М. Космические роботы для научных исследований // Наука в России. 2012. № 1. С. 4–14.

7. Космические модули комплекса «Фобос-Грунт» для перспективных межпланетных станций / Г. М. Полищук [и др.] // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2009. № 2. С. 3–7.

8. Modern State and Problems of the Russian Electric Propulsion Development for the Future Missions / V. P. Kim [et al.] // 60th International Astronautical Congress. October 12–16, 2009, Dajeon, Korea.

9. Продукция ОКБ «Факел». Направление СПД // Официальный сайт ФГУП ОКБ «Факел» [Электронный ресурс]. Дата обновления 25.06.2014. URL: http://www.fakel-russia/com/products.html (дата обращения: 15.12.2014).

10. RIT-22 Ion Engine Development-Endurance Test and Life Prediction / H. Leiter [et al.] // 42nd Joint

Propulsion Conference (July 9–12, 2006. Sacramento, California).

11. EADS Astrium Space Ion Propulsion Systems // Официальный сайт EADS Astrium [Электронный ресурс]. Дата обновления 09.12.2014. URL: http://cs.astrium.eads.net/sp/spacecraft-propulsion/ion-propulsion/index.html (дата обращения: 15.12.2014).

12. Мартынов М. Б., Петухов В. Г. Концепция применения электроракетной двигательной установки в научных космических проектах: преимущества и особенности, примеры реализации // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2011. № 2. С. 3–11.

13. Лёб Х. В., Петухов В. Г., Попов Г. А. Гелиоцентрические траектории космического аппарата с ионными двигателями для исследования Солнца // Труды МАИ : электрон. журнал. 2011. № 42. 22 с.

14. Петухов В. Г. Метод продолжения для оптимизации межпланетных траекторий с малой тягой // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 3. С. 258–270.

15. Константинов М. С., Петухов В. Г., Лёб Х. В. Применение высокочастотного ионного двигателя RIT-22 в проекте «Интергелио-Зонд» // Труды МАИ : электрон. журнал. 2012. № 60. 16 с.

References

1. Kuznetsov V. D. *Nauchnye zadachi proekta “Intergeliozond”. Proekt Intergeliozond. Trudy rabochego soveshaniya*. [Science goals of the project “Interhelio-Probe” Interhelioprobe Project. Workshop Proceedings]. Moscow, 2012, p. 5–14.

2. Asyushkin V. A. Vikulenkov V. P., Ishin S. V. [Outcome of development and operation initial phases of versatile space tugs of “Fregat”]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*, 2014, no. 1, p. 3–9 (In Russ.).

3. Morskoy I. M., Simonov A. V, Lyaskovskaya V. I., Ezhov A. S. [Ballistic support of development and fligt of “Fregat” versatile space tug]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*. 2014, no. 1, p. 10–15 (In Russ.).

4. Morozov V. V., Trunov Yu. V., Komissarov A. I. et al. [Control system of “Fregat” versatile space tug]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*, 2014, no. 1, p. 16–25 (In Russ.).

5. Aleksandrov L. G., Kuzmin O. A., Makarov V. P. [Propulsion system of reaction control system of “Fregat” upper stage]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2014, no. 1, p. 47–49 (In Russ.).

6. Efanov V. V., Matrynov M. B., Pichkhadze K. M. [Space robots for science researches]. *Nauka v Rossii.* 2012, no. 2, p. 4–14 (In Russ.).

7. Polishchuk G. M., Pichkhadze K. M., Efanov V. V., Martynov M. B. [Space modules of «Phobos-Grunt» space complex for next-generation interplanetary stations]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*. 2009, no. 2, p. 3–7 (In Russ.).

8. Kim V. P. et al. Modern State and Problems of the Russian Electric Propulsion Development for the Future Missions. *60th International Astronautical Congress.* Dajeon, Korea, October 12–16, 2009.

9. *Produkciya OKB “Fakel”. Napravleniye SPD.* [Production of FSUE EBD “Fakel”. SPD division]. Available at: http://www.fakel-rassia/com/products.html (accessed 15.12.2014).

10. Leiter H. et al. RIT-22 Ion Engine Development-Endurance Test and Life Prediction. *42nd Joint Propulsion Conference.* Sacramento. California, July 9–12, 2006.

11. EADS Astrium Space Ion Propulsion Systems. Available at: http://cs.astrium.eads.net/sp/spececraft-propulsion/ion-propulsion/index.html (accessed 15.12.2014).

12. Martynov M. B., Petukhov V. G. [Concept of electric propulsion applications in scientific space projects: advantages and special features, examples of implementation]. *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*. 2011, no. 2, p. 3–11 (In Russ.).

13. Loeb H. W., Petukhov V. G., Popov G. A. [Heliocentric trajectory of the spacecraft with ion engines for the study of the Sun]. *Trudy MAI*. 2011, no. 42 (In Russ.). Available at: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24275 (accessed 17.12.2014).

14. Petukhov V. G. [Continuation method for the optimization of interplanetary trajectories with low thrust]. *Kosmicheskie issledovania*. 2012, vol. 50, no. 3, p. 258–270 (In Russ.).

15. Konstantinov M. S., Petukhov V. G., Loeb H. W. [Application of RIT-22 Thruster for InterhelioProbe Mission]. *Trudy MAI*. 2012, no. 60 (In Russ.). Available at: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35372 (accessed 17.12.2014).

© Платов И. В., Симонов А. В., Константинов М. С., 2015

УДК 629.7.05.03

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 207–213

БОРТОВАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ

Д. В. Удалов

АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
E-mail: polus@online.tomsk.net

Современные инновационные тенденции развития космического приборостроения связаны с применением микропроцессорных технологий в бортовой аппаратуре. Поэтому в состав аппаратуры вводятся микропроцессорные системы управления, осуществляющие непосредственное управление прибором на основании внутренних алгоритмов, что позволяет перейти к распределенному принципу управления, в основе которого лежит идея о локализации функций управления приборами, находящимися на борту, внутри самих приборов.

В частности, при создании системы преобразования и управления нового поколения для электрореактивной двигательной установки в АО «НПЦ «Полюс» (г. Томск) разработана бортовая микропроцессорная субсистема обмена и управления, за счет интегрирования которой в указанную систему удалось не только улучшить ее массогабаритные показатели, но и расширить функциональные возможности.

Однако рост требований к космическим аппаратам в целом приводит к необходимости совершенствования и систем управления бортовой аппаратурой. Выполнение этих требований невозможно без применения современных интегральных схем со сверхбольшой степенью интеграции, изготовленных по нанометровым технологическим нормам. Как известно, такие схемы, выполненные по субмикронным технологиям, в отличие от микронных обладают более высокой чувствительностью к одиночным эффектам, вызванным воздействием тяжелых заряженных частиц космического пространства, что, в свою очередь, обусловливает необходимость принятия ряда специальных мер по обеспечению стойкости систем управления.

Рассмотрены способы повышения сбоеустойчивости микропроцессорных систем управления бортовой аппаратурой космических аппаратов. Показаны пути решения проблем, связанных с выбором электронных компонентов, схемотехнических и архитектурных решений для обеспечения стойкости к одиночным эффектам, вызванным тяжелыми заряженными частицами космического пространства. Предложена к реализации архитектура микропроцессорной системы управления с расширенными функциональными возможностями, высоким быстродействием и повышенной сбоеустойчивостью.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая микропроцессорная система, сверхбольшие интегральные схемы, тяжелые заряженные частицы, сбоеустойчивость, одиночные эффекты.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 207–213

SATELLITE-BORNE MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM WITH IMPROVE UPSET TOLERANCE

D. V. Udalov

SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
E-mail: polus@online.tomsk.net

Modern innovative trends in the development of space equipment are associated with the use of microprocessor technology in onboard hardware. Therefore, control systems, direct control of the device based on internal algorithms are introduced as the parts of the equipment microprocessor. That allows you to go to a distributed control principle on board the spacecraft, which is based on the idea of the localization of the control functions on board, inside the devices themselves.

In particular, the establishment of a power processing unit of the new generation for electric propulsion system in SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus” (Tomsk) developed satellite-borne microprocessor digital interface and control unit, by integrating in which said system is not only able to improve weight and overall dimensions but also to expand functionalities.

However, the growth requirements for space vehicles in general leads to the need to improve onboard microprocessor control system.These requirements are not possible without the use of modern integrated circuits with very large-scale integration level produced by nanometer technology standards. It is known that such schemes are made of submicron technology, unlike micron are more sensitive to single effects caused by exposure to heavy charged particles of space, which, in turn, necessitates the adoption of a number of special measures to ensure the stability of control systems.

This article discusses the ways to increase upset immunity microprocessor control systems onboard equipment spacecraft. The ways of solving the problems associated with the selection of electronic components, circuit design and architectural solutions for resistance to single effects caused by heavy charged particles of space are shown. We offer to implement the architecture of a microprocessor control system with advanced features, high performance and enhanced upset immunity.

Keywords: spacecraft, satellite-borne microprocessor control system, very large scale integrated circuits, heavy charged particles, upset tolerance, single event effects.

Введение. Современные тенденции развития космического приборостроения связаны с применением микропроцессорных технологий. В частности, при создании системы преобразования и управления (СПУ) нового поколения для электрореактивной двигательной установки [1] в АО «НПЦ «Полюс» (г. Томск) разработана бортовая микропроцессорная субсистема обмена и управления (СОУ) [2], за счет интегрирования которой в СПУ удалось не только улучшить массогабаритные показатели, но и расширить функциональные возможности последней. Основными задачами СОУ являются сбор и первичная обработка телеметрических данных с датчиков, обмен информацией с бортовым вычислительным комплексом и управление электрореактивной двигательной установкой.

Актуальность работ. Рост требований к космическим аппаратам в целом приводит к необходимости совершенствования и систем управления бортовой аппаратурой.

Наиболее актуальными требованиями, предъявляемыми сейчас к интегрируемым микропроцессорным системам управления, являются внедрение современного интерфейса Space Wire, обновление программного обеспечения в процессе эксплуатации, в том числе на орбите, локальная обработка и накопление данных, работа в автоматическом режиме, обеспечение стойкости к тяжелым заряженным частицам, повышение надежности и улучшение массогабаритных характеристик. Выполнение их невозможно без применения современных интегральных схем со сверхбольшой степенью интеграции, изготовленных по нанометровым технологическим нормам. Как известно, такие схемы, выполненные по субмикронным технологиям, в отличие от микронных, обладают более высокой чувствительностью к одиночным эффектам, вызванным воздействием космического излучения [3]. Это, в свою очередь, обусловливает необходимость принятия ряда специальных мер по обеспечению стойкости систем управления к одиночным эффектам.

В настоящее время в АО «НПЦ «Полюс» ведутся работы по созданию микропроцессорной системы управления СОУ-2М с повышенной сбоеустойчивостью, что позволит на базе только отечественных электрорадиоизделий производить функционально законченные, высокопроизводительные и стойкие к одиночным эффектам устройства.

Предложенная к реализации архитектура обладает расширенными функциональными возможностями и высоким быстродействием, разрабатывается на основе решений, использованных и опробованных в СОУ. Сравнение основных технических характеристик и примененных методов обеспечения сбоеустойчивости СОУ и СОУ-2М показывает преимущество последней.

Субсистема обмена и управления СОУ. СОУ построена по двухканальной схеме «ненагруженного резерва» и состоит из двух одинаковых модулей. Выбор активного из них осуществляется подачей на него напряжения питания. Каждый модуль СОУ (рис. 1) состоит из устройства управления и вычисления (УУВ), вторичного источника питания (ВИП), а также устройства коммутации и сопряжения (УКС).

Устройство управления и вычисления СОУ. УУВ (рис. 2) является ядром СОУ и управляет всей системой. Основные сверхбольшие интегральные схемы, входящие в состав УУВ, – система на кристалле (СнК), интерфейсный контроллер (ИК) и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

СнК состоит из процессора с архитектурой MIPS32, сопроцессора вещественной арифметики (FPU), контроллера памяти, интерфейсов UART и контроллера шины PCI. Контроллер памяти имеет встроенный контроллер корректирующих кодов (SEC/DED), позволяющий исправлять одиночные и обнаруживать двойные ошибки, вызванные одиночными событиями [4–6].

ИК обеспечивает подключение специализированных устройств к шине PCI. В состав ИК входят два резервированных контроллера мультиплексного канала обмена (МКО) [7] и резервированный контроллер памяти, посредством которого реализовано взаимодействие с ПЛИС [8].

На базе ПЛИС выполнен контроллер резервированного последовательного синхронного интерфейса (SPI) для организации канала связи между УУВ и УКС. Данные, передаваемые по интерфейсу SPI, защищены битом четности.

Вторичный источник питания СОУ. ВИП (рис. 2) обеспечивает гальваническую развязку и формирование вторичных напряжений питания УУВ и УКС по входной бортовой шине «27 В».

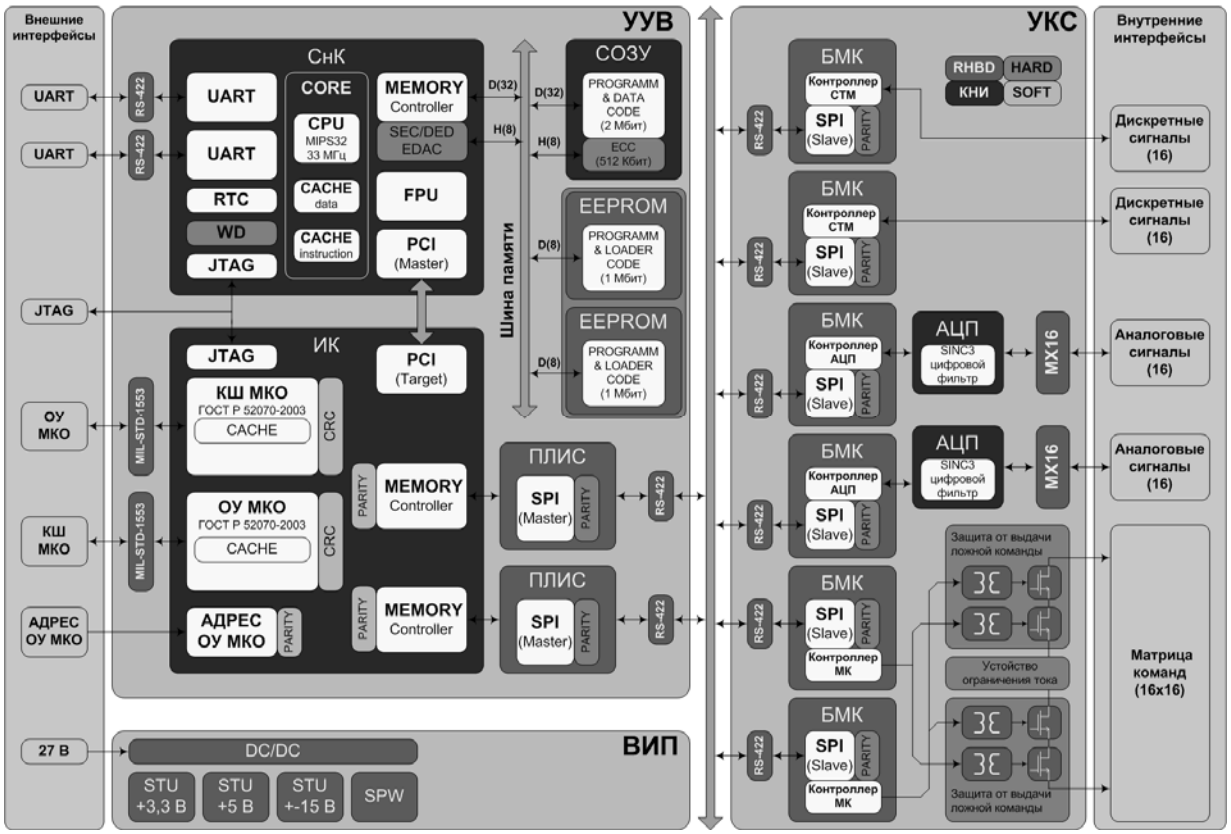


Рис. 1. Структурно-функциональная схема СОУ

Устройство коммутации и сопряжения СОУ. УКС (рис. 3) является устройством сопряжения УУВ с датчиками и объектами управления СПУ. Основные функции, выполняемые УКС, – сбор и обработка информации с аналоговых и сигнальных датчиков, а также формирование матричных команд управления силовыми устройствами СПУ.

Для выполнения указанных функций в УКС введены соответствующие контроллеры, реализованные на базовых матричных кристаллах (БМК) и подключенные к сетевому интерфейсу SPI.

Контроллер аналоговой телеметрии (АТМ) состоит из двух независимых каналов измерения, работающих синхронно. Результаты синхронных измерений можно использовать для вычисления мгновенной мощности. Каждый канал представляет собой мультиплексированную систему сбора информации, которая состоит из мультиплексора 16×1, 24-разрядного ∑Δ–АЦП, аппаратного цифрового фильтра и устройства системной калибровки. Каждый канал обрабатывает 16 аналоговых сигналов.

Контроллер сигнальной телеметрии (СТМ) осуществляет сбор сигнальной телеметрии и также имеет два независимых канала измерения дискретных сигналов, работающих синхронно. Каждый канал снимает показания с 16 сигнальных датчиков и осуществляет программную цифровую фильтрацию собранных данных. Каждый из датчиков может быть типа «незапитанный контакт» или «открытый коллектор».

Контроллер матричных команд (МК) формирует сигналы управления матрицей команд 16×16 (256 матричных команд), которая подключена к бортовой шине питания «27 В». Ток коммутации каждого ключа матрицы составляет 2 А.

На программно-аппаратном уровне СОУ обеспечивает невыдачу ложной команды в случае отказа или одиночного сбоя как в силовом ключе, так и в цепях управления. Каждый ключ матрицы команд резервирован от короткого замыкания. Длительность матричных команд задается программно и может варьироваться от 50 до 250 мс. Сторожевой таймер контроллера МК аппаратно ограничивает длительность матричной команды на уровне 250 мс в случае сбоя или неисправности. Трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку цепей управления от силовых цепей и объектов управления.

Субсистема обмена и управления СОУ-2М. СОУ-2М (рис. 4) унаследовала свой структурный состав от СОУ. Она также построена по двухканальной схеме «ненагруженного резерва» и состоит из двух одинаковых модулей. Выбор активного из них осуществляется подачей на него напряжения питания. Каждый модуль СОУ-2М состоит из устройства управления и вычисления, вторичного источника питания и устройства коммутации и сопряжения.

Устройство управления и вычисления СОУ-2М. УУВ СОУ-2М построено на базе модифицированной СнК, в которой был реализован целый ряд мер по парированию одиночных сбоев. Так, используется троированное микропроцессорное ядро с архитектурой MIPS32 и тактовой частотой 66 МГц, контроллер памяти с контроллером корректирующих кодов (SEC/DED) [9], кэш-инструкций и данных, реализованный на DICE-ячейках (Dual Inter-locked Storage Cell) с контролем четности, все регистры процессора также реализованы на DICE-ячейках [10; 11].

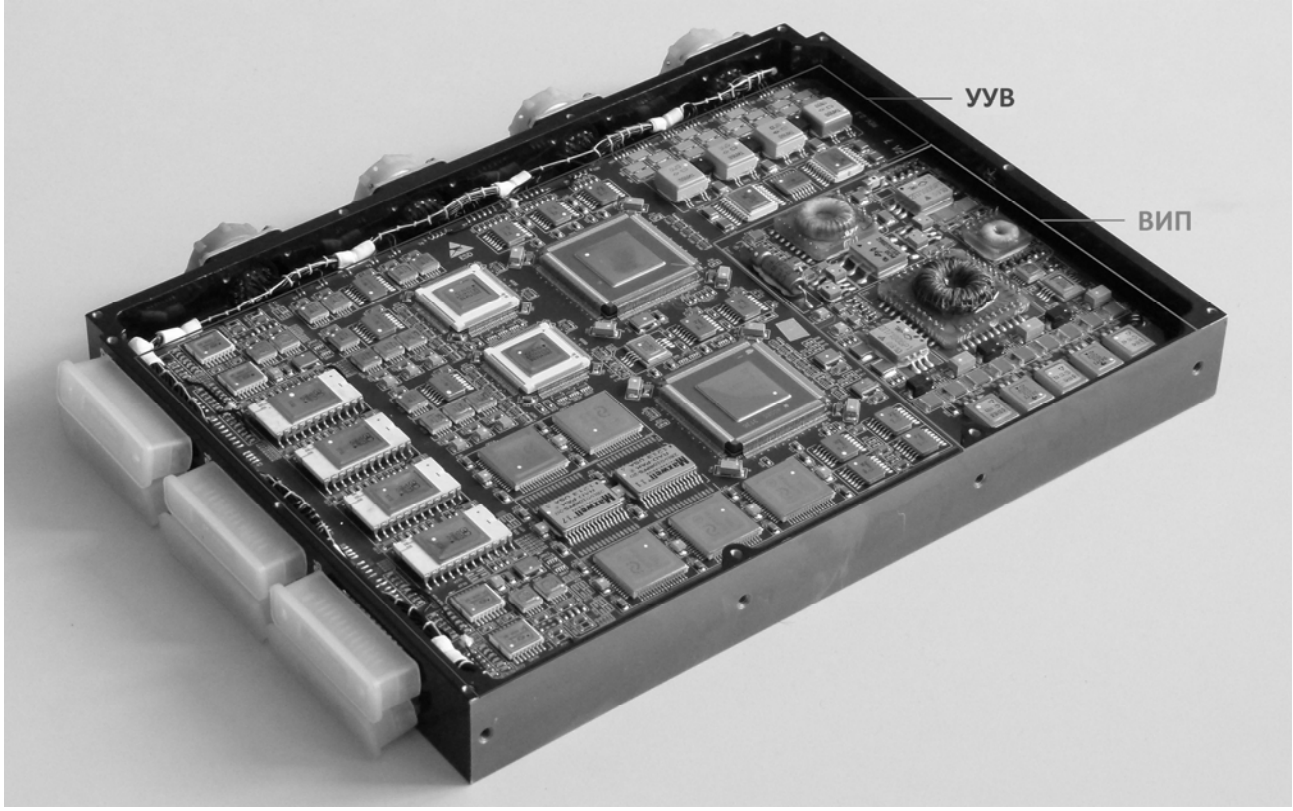


Рис. 2. Внешний вид УУВ и ВИП

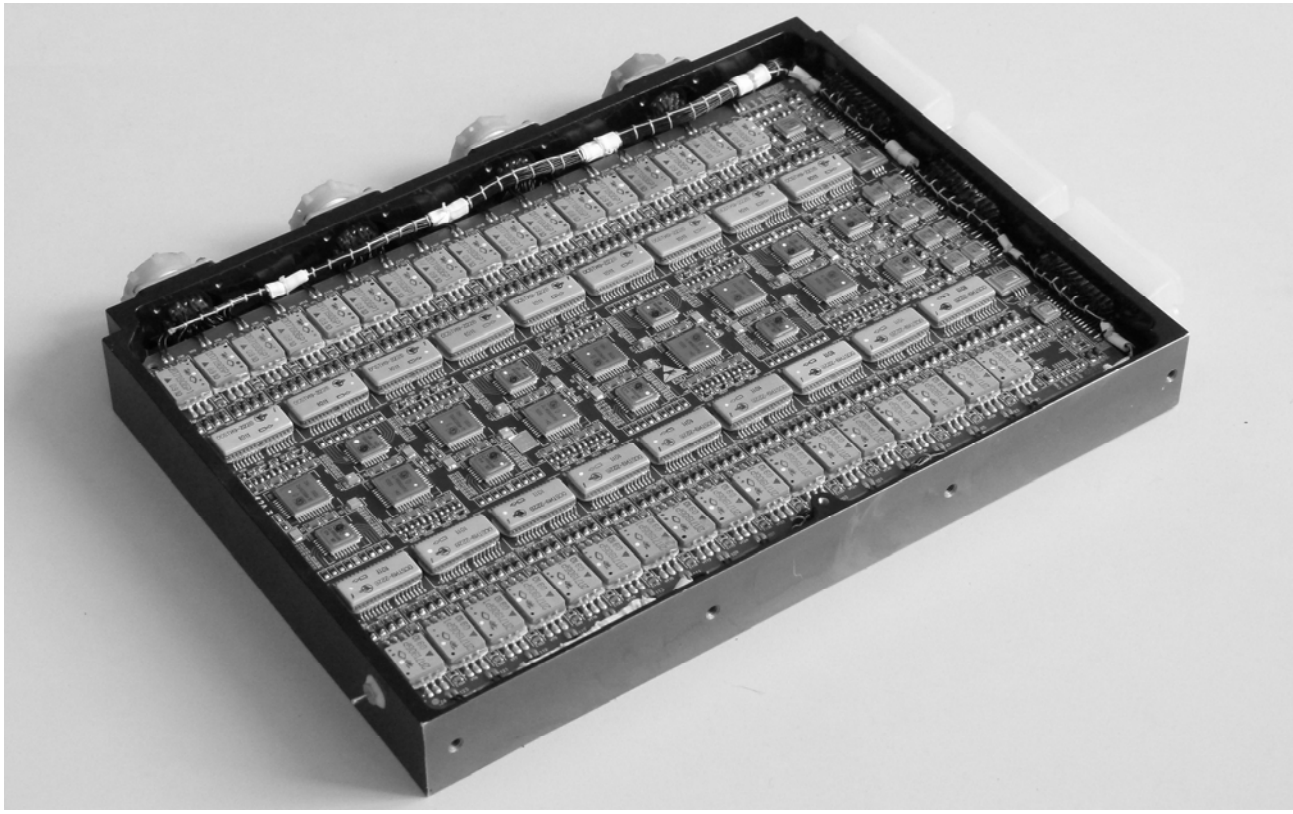


Рис. 3. Внешний вид УКС

В состав СнК также входят два резервированных контроллера МКО, соответствующие ГОСТ Р 52070–2003 [7], два контроллера Space Wire, соответствующие стандарту ECSS-E-ST-50-12C [12], два контроллера UART, контроллер интерфейса SPI [13; 14] и сопроцессор вещественной арифметики FPU.

Для обеспечения толерантности к тиристорному эффекту кристалл СнК выполнен по технологии «кремний на изоляторе» (КНИ) с проектными нормами 240 нм [15].

В состав УУВ СОУ-2М входит статическое запоминающее устройство (СОЗУ) с объемом 4 Мбита для данных и 1 Мбит для корректирующих кодов [9; 16]. СОЗУ также выполнено по технологии КНИ с проектными нормами 240 нм.

В качестве загрузочного используется однократно программируемое постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) с ячейками antifuse. Объем его составляет 1 Мбит для данных и 1 Мбит для корректирующих кодов. Загрузочное ПЗУ выполнено по технологии КНИ с проектными нормами 180 нм.

В состав УУВ СОУ-2М входит энергонезависимое постоянное запоминающее устройство (ЭПЗУ) типа F-RAM, разбитое на два независимых банка, каждый из которых имеет объем 4 Мбита для данных и 1 Мбит для корректирующих кодов. В ЭПЗУ записано системное программное обеспечение, которое можно обновить по каналу МКО или Space Wire в процессе эксплуатации на орбите.

Вторичный источник питания СОУ-2М. ВИП СОУ-2М обеспечивает гальваническую развязку и формирование вторичных напряжений питания УУВ и УКС по входной бортовой шине «27 В».

Устройство коммутации и сопряжения СОУ-2М. В УКС СОУ-2М для повышения сбоеустойчивости были модифицированы интерфейс связи с УУВ и контроллеры устройств сопряжения. Для реализации их функций вместо БМК используется сбоеустойчивая ПЛИС с логической емкостью 50 тыс. вентилей. Данная ПЛИС выполнена на объемном кремнии с проектными нормами 180 нм. Для обеспечения стойкости к одиночным событиям все триггеры и элементы памяти в ПЛИС реализованы на DICE-ячейках. Кроме того, в рабочем режиме ПЛИС проводит верификацию конфигурационной памяти и в случае ошибки автоматически выполняет реконфигурацию.

В качестве конфигурационного ПЗУ используется однократно программируемое ПЗУ с ячейками antifuse. Объем конфигурационного ПЗУ составляет 1 Мбит.

Для обеспечения стойкости к одиночным событиям все функциональные узлы, выполненные на ПЛИС, резервированы.

Используемые методы обеспечения сбоеустойчивости и основные технические характеристики СОУ и СОУ-2М приведены в таблице.

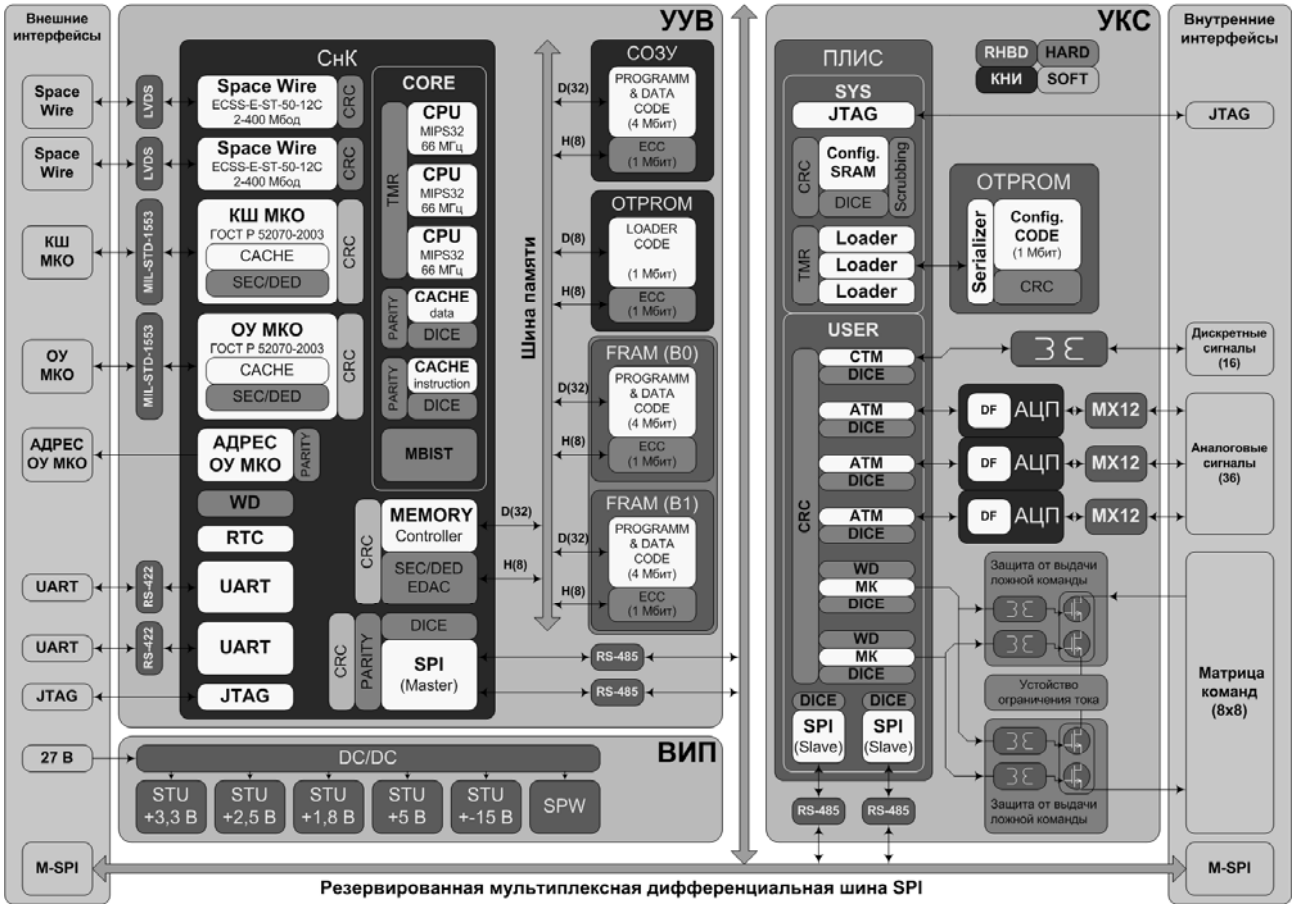


Рис. 4. Структурно-функциональная схема СОУ-2М

Сравнение основных характеристик и применяемых методов повышения сбоеустойчивости СОУ и СОУ-2М

Параметр	СОУ	СОУ-2М
Общие		
Год разработки	2012	2014
Габариты и масса (один канал)	270×195×30 мм, 1,2 кг	265×195×20 мм, 0,9 кг
Питание	23–31 В (6 Вт)	23–31 В (6 Вт)
ЭРИ иностранного производства	28LV010RPFS-20	Отсутствуют
Процессор		
Реализация	5890ВЕ1Т	«Обработка-10»
Архитектура	КОМДИВ (MIPS32)	КОМДИВ (MIPS32)
Производительность	22 MIPS	53 MIPS
Методы снижения сбоев	КНИ	КНИ, TMR, PARITY, DICE
Системное ОЗУ		
Тип	SRAM	SRAM
Объем	2 Мбит (64К×32+ECC)	4 Мбит (128К×32+ECC)
Методы снижения сбоев	КНИ, SEC/DED	КНИ, SEC/DED
Загрузочное ПЗУ		
Тип	EEPROM	ANTIFUSE
Объем	2×256 Кбит (2×32К×8)	1 Мбит (128К×8+ECC)
Перезапись при эксплуатации	Да	Нет
Методы снижения сбоев	DOUBLE, CRC	КНИ, SEC/DED, CRC
Системное ПЗУ		
Тип	EEPROM	FRAM
Объем	1536 Кбит (192К×8)	2×4 Мбит (2×128К×32+ECC)
Перезапись при эксплуатации	Да	Да
Методы снижения сбоев	CRC	DOUBLE, SEC/DED, CRC
Внешние интерфейсы		
Реализация	5890ВГ1Т	«Обработка-10»
МКО (ГОСТ Р 52070–2003)	2 (ОУ, КШ, МШ)	1 (ОУ), 1 (КШ, МШ)
Space Wire (ECSS-E-ST-50-12C)	Нет	2 (2–400 Мбод)
Методы снижения сбоев	КНИ, CRC	КНИ, SEC/DED, CRC
Отладочные интерфейсы		
UART (RS-422)	2 (115 Кбод)	2 (115 Кбод)
JTAG (IEEE 1149.1)	2 (СНК и ПЛИС)	2 (СНК и ПЛИС)
Межблочный интерфейс		
Реализация	2×5576ХС2Т (ПЛИС)	«Алмаз-2» (ПЛИС)
Протокольный уровень	Дублированный SPI	Резервированный SPI
Физический уровень	2×4×RS-422 (1 Мбод)	2×4×RS-485 (10 Мбод)
Методы снижения сбоев	DOUBLE, PARITY	REDUNDANCY, TMR, DICE, CRC
Аналоговый интерфейс		
Аналоговые входы	4×8 (13 бит)	3×12 (16 бит)
Цифровая фильтрация	4×SINC3	3×SINC3
Методы снижения сбоев	КНИ	КНИ, DICE, CRC
Сигнальный интерфейс		
Сигнальные входы	2×16 («НК», «ОК»)	2×8 («НК», «ОК»)
Гальваническая развязка	Нет	Да (250 В)
Методы снижения сбоев	PARITY	DICE, CRC
Матричные команды		
Матричные выходы	16×16 (2 А, 27В)	8×8 (2 А, 27 В)
Ограничение тока	Да (2 А)	Да (2 А)
Гальваническая развязка	Да (250 В)	Да (250 В)
Методы снижения сбоев	REDUNDANCY, PARITY, WD	REDUNDANCY, DICE, WD, CRC

Заключение. Использование оригинальных архитектурных решений, методов парирования сбоев, а также перспективных ЭРИ отечественного производства позволило разработать микропроцессорную систему управления с повышенной устойчивостью к внешним воздействующим факторам космического пространства.

Библиографические ссылки

1. Ермошкин Ю. М. Основы теории и расчета электрореактивных двигательных установок : учеб. пособ. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2003. 159 с.

2. Удалов Д. В., Пухтий С. Б., Седнев Ю. С. Бортовая микропроцессорная субсистема управления для электрореактивной двигательной установки // Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. тр. / ОАО «НПЦ «Полюс». Томск, 2011. С. 139−147.

3. Santarini M. Cosmic radiation comes to ASIC and SOC design. EDN. 5/12/2005 [Электронный ресурс]. URL: http://edn.com/article/CA529381.html (дата обращения: 20.12.2013).

4. Филипчук Е. В., Пахомов С. И. Теория информации и помехоустойчивое кодирование. М. : МИФИ, 1989. 118 с.

5. Hsiao M. Y. A Class of Optimal Minimum Odd-Weight-Column SEC-DED Codes // IBM J. Res. Develop. 1970. T. 14. P. 395−401.

6. Хемминг Р. В. Численные методы. М. : Наука, 1972. 400 с.

7. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. М. : Госстандарт России, 2003.

8. ПЛИС для космических применений. Архитектурные и схемотехнические особенности / В. Телец [и др.] // Электроника: наука, технология, бизнес. 2005. № 6. С. 44–48.

9. Краснюк А. А., Петров К. А. Особенности применения помехоустойчивого кодирования в СУБ-100 на микросхемах памяти для космических систем // Микроэлектроника. 2012. Т. 41, № 6. С. 450−456.

10. Юдинцев В. Радиационно стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 5. С. 72–77.

11. Mayer D. C., Lacoe R. C. Designing Integrated Circuits to Withstand Space Radiation [Электронный ресурс] Vol. 4, № 2. URL: http://aero.org/publications/crosslink/summer2003/06.html (дата обращения: 20.05.2014).

12. ECSS-E-50-12C. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008.

13. SPI Block Guide V03.06, FreeScale Semiconductor [Электронный ресурс]. URL: http://freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/S12SPIV3.pdf (дата обращения: 20.05.2014).

14. MICROWIRE™ Serial Interface. National Semiconductor Application Note 452, Abdul Aleaf, Jan. 1992 [Электронный ресурс]. URL: http://national.com/an/AN/AN-452.pdf (дата обращения: 20.05.2014).

15. Romanko Th., Clegg B. SOI eases radiation-hardened ASIC design [Электронный ресурс]. URL: http://eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=165700727 (дата обращения: 20.05.2014).

16. Calin T., Nicolaidis M., Velazco R. Upset hardened memory design for submicron CMOS technology // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. Vol. 43(6). P. 2874–2878.

Reference

1. Ermoshkin U. M. *Osnovy teorii i rascheta elektroreaktivnykh dvigatelnykh ustanovok* [Fundamentals of the theory and calculation of electric propulsion systems]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2003, 159 p.

2. Udalov D. V., Puxtiy S. B., Sednev U. S. [The onboard microprocessor subsystem management for electric propulsion system]. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva. Sb. nauch. tr.* [Electronic and electromechanical systems and device. Collection of scientific papers]. JSC “SIC “Polyus”. Tomsk, 2011, p. 139−147 (In Russ.).

3. Santarini M. Cosmic radiation comes to ASIC and SOC design. EDN. 5/12/2005. Available at: http://edn.com/article/CA529381.html (accessed 20.12.2013).

4. Filipchuk E. V., Paxomov S. I. *Teoriya informatsii i pomekhoustochivoe kodirovanie*. [Information Theory and noiseless coding]. Moscow, MIFI Publ., 1989, 118 p.

5. Hsiao M. Y. A Class of Optimal Minimum Odd-Weight-Column SEC-DED Codes. *IBM J. Res. Develop*. 1970, vol. 14, p. 395−401.

6. Xemming R. V. *Chislennye metody.* [Numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 400 p.

7. *GOST R 52070-2003. Interfeys magistral'noy posledovatel'noy sistemy elektronnykh moduley.* [State Standard R 52070-2003. Serial interface trunk system of electronic modules]. Moscow, Standardinform Publ., 2003 (In Russ.).

8. Telec V., Cybin S., Bystrickiy A., Podyapolskiy S. [FPGAs for space applications. Architectural and circuit features]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes.* 2005, no. 6, p. 44–48 (In Russ.).

9. Krasnyk A. A, Petrov K. A. [Features of the application error-correcting coding in the sub-100 nm memory chips for space systems]. *Mikroelektronika.* 2012, vol. 41, no. 6, p. 450–456 (In Russ.).

10. Yudintsev V. [Radiation-resistant integrated circuit. Reliability in space and on the ground]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes.* 2007, no. 5, p. 72–77 (In Russ.).

11. Donald C. Mayer, Ronald C. Lacoe. Designing Integrated Circuits to Withstand Space Radiation. Vol. 4, no. 2. Available at http://aero.org/publications/crosslink/summer2003/06.html (accessed 20.05.2014).

12. ECSS-E-50-12C. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008.

13. SPI Block Guide V03.06, FreeScale Semiconductor. Available at: http://freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/S12SPIV3.pdf (accessed 20.05.2014).

14. MICROWIRE™ Serial Interface. National Semiconductor Application Note 452, Abdul Aleaf, Jan. 1992. Available at: http://national.com/an/AN/AN-452.pdf (accessed 20.05.2014).

15. Romanko Th., Clegg B. SOI eases radiation-hardened ASIC design. Available at: http://eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=165700727 (accessed 20.05.2014).

16. Calin T., Nicolaidis M., Velazco R. Upset hardened memory design for submicron CMOS technology. *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 1996. Vol. 43(6), p. 2874–2878.

© Удалов Д. В., 2015

УДК 681.327.8

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 214–223

МОДУЛЬ МУЛЬТИПЛЕКСНОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

С. А. Щербаков*, В. В. Игнатовский, С. Ю. Филонова

АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
*E-mail: polus@online.tomsk.net

Статья посвящена вопросам работы с интерфейсом мультиплексного канала обмена информацией, описанным в ГОСТ Р 52070−2003 и зарубежном стандарте MIL-STD-1553B. Во введении рассматриваются абоненты интерфейса, функционирующие в составе системы обмена информацией, и актуальные модули, выполняющие функции оконечных устройств в бортовой аппаратуре космических аппаратов.

Далее внимание уделено модулю, активно использующемуся в настоящее время. Указываются его основные недостатки и проблемы использования в космической аппаратуре, приводится структурная схема устройства. Представлены текущие разработки, проводимые в НПЦ «Полюс», связанные с реализацией интерфейса мультиплексного канала обмена и с модулями оконечных устройств: на базе СБИС Н1582ВЖ2 и Н1582ВЖ3В. Приводятся недостатки модуля, основанного на СБИС Н1582ВЖ2, в дальнейшем устраненные в модуле на базе СБИС Н1582ВЖ3В. Рассмотрены их структурно-функциональные схемы, кратко описан принцип работы модуля с Н1582ВЖ2 и более подробно рассказано о функционировании модуля с Н1582ВЖ3В. Показаны временные диаграммы логики работы модуля обмена и циклограммы режима записи во внешние устройства и чтения из внешних устройств по параллельному интерфейсу, подробно описаны указанные циклограммы. Приведена фотография модуля мультиплексного канала с СБИС Н1582ВЖ3В.

Представлены результаты тестирования разработанного модуля на базе СБИС Н1582ВЖ3В на соответствие ГОСТ Р 52070−2003. Рассказывается о проверке на соответствие логическому протоколу интерфейса, а также приведены данные проверки электрических параметров сигналов, в частности, входных и выходных. Описана и представлена в виде диаграмм реакция модуля на некоторые команды управления. Приведены осциллограммы электрических сигналов, а их подробные характеристики собраны в таблицы.

В заключение приводится представленное в виде таблицы сравнение модулей, упомянутых ранее. В качестве вывода авторы рассуждают о возможном применении разработанного модуля в бортовой аппаратуре космических аппаратов.

Ключевые слова: мультиплексный канал обмена, модуль обмена, оконечное устройство, командное слово, ответное слово.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 214–223

INFORMATION INTERCHANGE MULTIPLEX CHANNEL MODULE

S. A. Shcherbakov*, V. V. Ignatovskiy, S. Yu. Filonova

SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
*E-mail: polus@online.tomsk.net

This paper refers to the work with the interface of information interchange multiplex channel described in GOST R 52070-2003 and foreign standard MIL-STD-1553B. In introduction authors discuss the interface of consumers, operating in a system of information exchange, and the actual modules that function as endpoints in onboard spacecraft equipment.

Further attention is given to the module which is actively used nowadays. In the article module’s main disadvantages and problems of using in the spacecraft equipment are specified, the block diagram of the device is presented. The article also presents the current developments associated with the interchange multiplex interface modules and terminal devices that carried out in RPC “Polyus”. Thus, the article presents two versions of modules, based on ASIC N1582VJ2 and N1582VJ3V. The shortcomings of the module, based on ASIC N1582VJ2, are given, further eliminated in the module based on N1582VJ3V. Their structural and functional diagrams are considered, briefly described the principle of operation of the module based on N1582VJ2, and the functioning of the module based on N1582VJ3V is described in more detail. Timing diagrams of the exchange module logic and the switching diagrams of the parallel interface read and write mode to external devices are shown, and the last are described in detail. A photo of the multiplex channel module based on N1582VJ3V is presented.

Next, the authors publish the results of testing the developed module based on N1582VJ3V against GOST R 52070-2003. The verification of compliance to the logical interface protocol, as well as the electrical parameters of the signals, in particular the input and output, is described. The module response to some commands in the form of diagrams is presented and described. The waveforms of electrical signals are shown, and their detailed characteristics are collected in the table.

In conclusion, the article gives the tabular comparison of the modules mentioned earlier. In the end, the authors talk about the possible uses of the module in the onboard equipment of spacecraft.

Keywords: interchange multiplex channel, interchange module, remote terminal, command word, response word.

Введение. В настоящее время в космических аппаратах в качестве межсистемной магистрали для связи отдельных бортовых систем с бортовым компьютером применяется мультиплексный канал обмена (МКО) по ГОСТ Р 52070−2003 и MIL-STD-1553B [1; 2]. Абоненты интерфейса МКО представлены тремя отдель-ными устройствами [3]:

− контроллер шины (КШ) МКО, управляющий обменом информацией в интерфейсе, включая передачу команд в магистраль, прием и передачу слов данных (СД), прием и контроль ответной информации о состоянии оконечных устройств и абонентов [4];

− оконечное устройство (ОУ) МКО, функционирующее в соответствии с командами КШ, которое должно распознавать командные слова (КС) от КШ и отвечать на них, и выполнять команды управления;

− монитор шины, осуществляющий отбор информации, передаваемой по информационной магистрали, техническое обслуживание, регистрацию параметров и анализ решаемых задач [5].

Блоки приборов космических аппаратов, выпускаемые предприятиями космической отрасли, чаще всего применяются в качестве ОУ при обмене информацией с бортовым компьютером. Реализуют это специальные автономные модули МКО. В настоящее время широко применяются модули производства ОАО «Субмикрон» [6] и ЗАО НТЦ «Модуль» [7−9].

Обзор модулей мультиплексного канала обмена. Модуль МО МКО производства ОАО «Субмикрон» (рис. 1) выполняет основные команды управления интерфейса обмена согласно ГОСТ Р 52070−2003. Конструктивно он состоит из дискретных элементов на керамической плате с планарными выводами. Для его функционирования требуются внешние электрорадиоизделия (ЭРИ). Кроме того, модуль содержит ЭРИ иностранного производства индустриального качества исполнения, и для его работы требуется питание от двух источников напряжения +5 и +12 В.

В качестве альтернативы данному модулю в АО «НПЦ «Полюс» проведена разработка собственного модуля оконечного устройства. МОУ МКО (рис. 2), который базируется на СБИС Н1582ВЖ2-0361 производства НПО «Физика», (г. Москва), выполняет основные команды управления, предусмотренные ГОСТ Р 52070−2003, и формирует три признака в ответном слове [10]. Конструкция устройства представляет собой встраиваемый модуль, выполненный на печатной плате размером 75×75 мм. Питание осуществляется от двух источников напряжения +5 и +9 В.

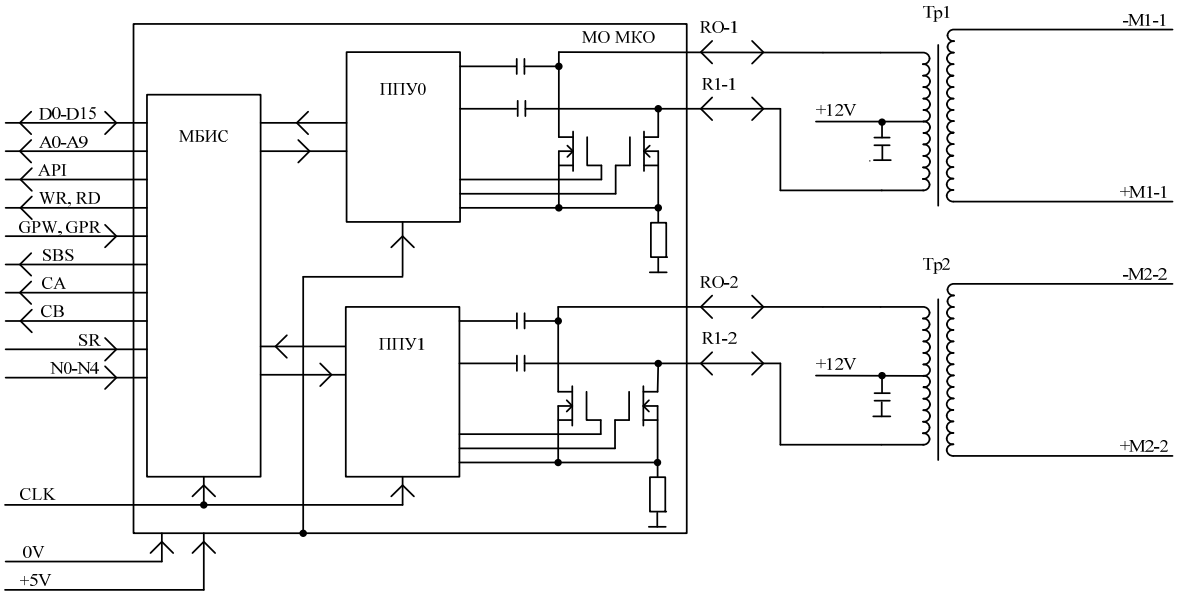


Рис. 1. Структурная схема МО МКО производства ОАО «Субмикрон»: МБИС − контроллер обмена; ППУ0, ППУ1 − приемопередающие устройства основного и резервного каналов; A0−A9 − шина адреса; D0−D15 − шина данных; API − сигнал активации шины; WR/RD − строб записи/чтения; GPW/GPR − сигнал готовности записи/чтения; SBS − сигнал сбоя обмена; CA/CB − сигналы управления; SR − сигнал начальной установки; N0−N4 − адрес ОУ; CLK − сигнал тактовой частоты; -M1-1, +M1-1, -M2-2, +M2-2 − линия МКО; Тр1, Тр2 − трансформаторы гальванической развязки; +5V/+12V/0V − выводы питания

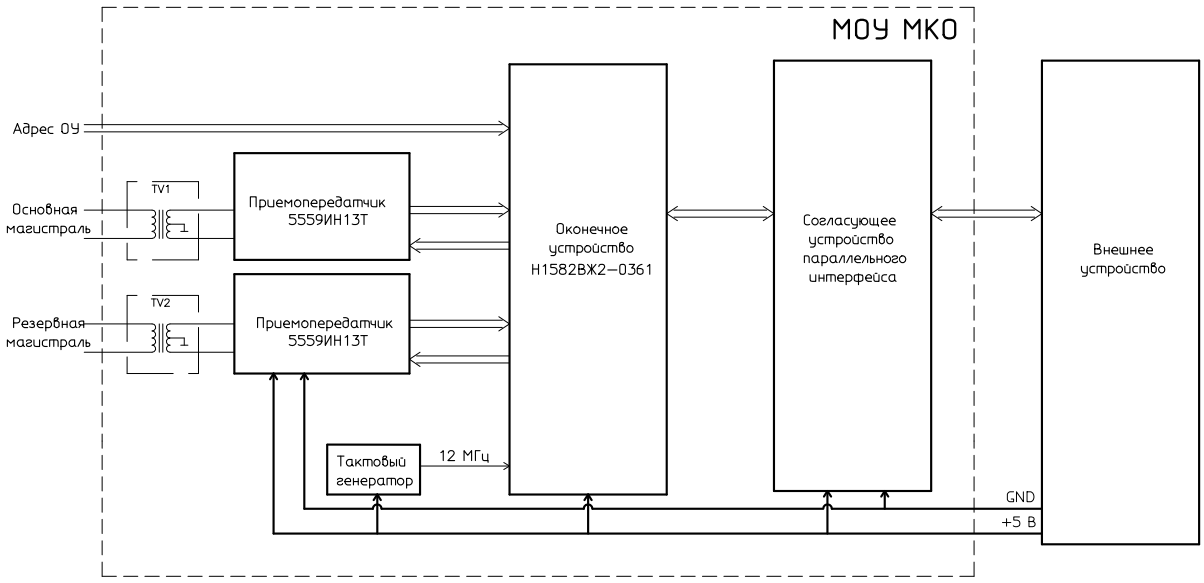


Рис. 2. Структурная схема МОУ МКО (Н1582ВЖ2-0361):
TV1, TV2 − трансформаторы гальванической развязки

Модуль функционирует в составе аппаратуры пользователя автономно, команды управления выполняет без участия аппаратуры пользователя, команды передачи данных выполняются через дублированную гальванически развязанную двунаправленную шину (основная/резервная магистраль). Интерфейс с внешним устройством представляет собой двунаправленную 12-разрядную шину данных, 10-разрядную шину адреса, управляемые сигналами сопровождения обмена WR/RD (строб записи/чтения), API (сигнал активации шины данных). Согласующее устройство параллельного интерфейса служит для сопряжения уровней сигналов ОУ с уровнями сигналов внешнего устройства.

ОУ на базе СБИС Н1582ВЖ2-0361 в соответствии с рекомендациями производителя работает с приемопередатчиками 5559ИН13Т [11]. Однако данная микросхема имеет ряд недостатков. Во-первых, для реализации МКО одной микросхемы приемопередатчика недостаточно, приходится использовать две. Во-вторых, она не удовлетворяет жестким требованиям по стойкости к воздействию специальных факторов космического пространства, что накладывает ограничение на применение МОУ МКО в составе бортовой аппаратуры [12].

Исходя из вышесказанного, в АО «НПЦ «Полюс» был разработан модуль мультиплексного канала обмена информацией на основе СБИС Н1582ВЖ3В-0244, в котором устранены перечисленные недостатки (рис. 3). Он более соответствует логическому протоколу ГОСТ Р 52070−2003 и питается от одного источника напряжения +5 В. СБИС Н1582ВЖ3В-0244 способна работать со всеми десятью форматами сообщений, имеет увеличенный в два раза интервал обмена с подсистемой [13]. МОУ МКО представляет собой встраиваемую конструкцию, выполненную на печатной плате размером 75×75 мм (рис. 4).

Приемопередатчики обеспечивают передачу информации биполярным фазоманипулированным кодом «Манчестер II» [14]. Резервирование линии передачи информации осуществляется на уровне приемопередатчиков.

Трансформаторы гальванической развязки (Тр) предназначены для подключения МОУ МКО к магистральной шине.

ОУ выполняет прием и дешифрацию командных слов КШ, формирует и выдает в канал ОС, выполняет команды управления КШ без участия аппаратуры пользователя, обеспечивает форматы сообщений 1, 2, 4 в соответствии с ГОСТ Р 52070−2003. Обмен данными между модулем и внешним устройством происходит только по инициативе ОУ.

ГОЧ синхронизирует обмен данными между МОУ МКО и контроллером шины по МКО и между МОУ МКО и внешним устройством по параллельному интерфейсу.

ФУС формирует стробы записи WR и чтения RD, сигнал активизации шины параллельного интерфейса API, а также сигналы управления БВС и ОУ.

БВС выполняет функцию самоконтроля ОУ. При получении команды управления «Начать самоконтроль ОУ» ОУ передает ОС и МОУ МКО переходит в соответствующий режим. При этом процедуры записи и чтения происходят следующим образом. По КС на запись, полученному с МКО, БВС фиксирует в регистре последнее СД. По КС чтения, полученному с МКО, МОУ МКО выдает данные из регистра БВС. В случае чтения нескольких СД выдается одно и то же записанное, последнее из них (рис. 5).

В каждый момент времени функционирует только один информационный канал (основной или резервный), второй находится в ненагруженном состоянии.

Адрес ОУ устанавливается замыканием внешних контактов МОУ МКО.

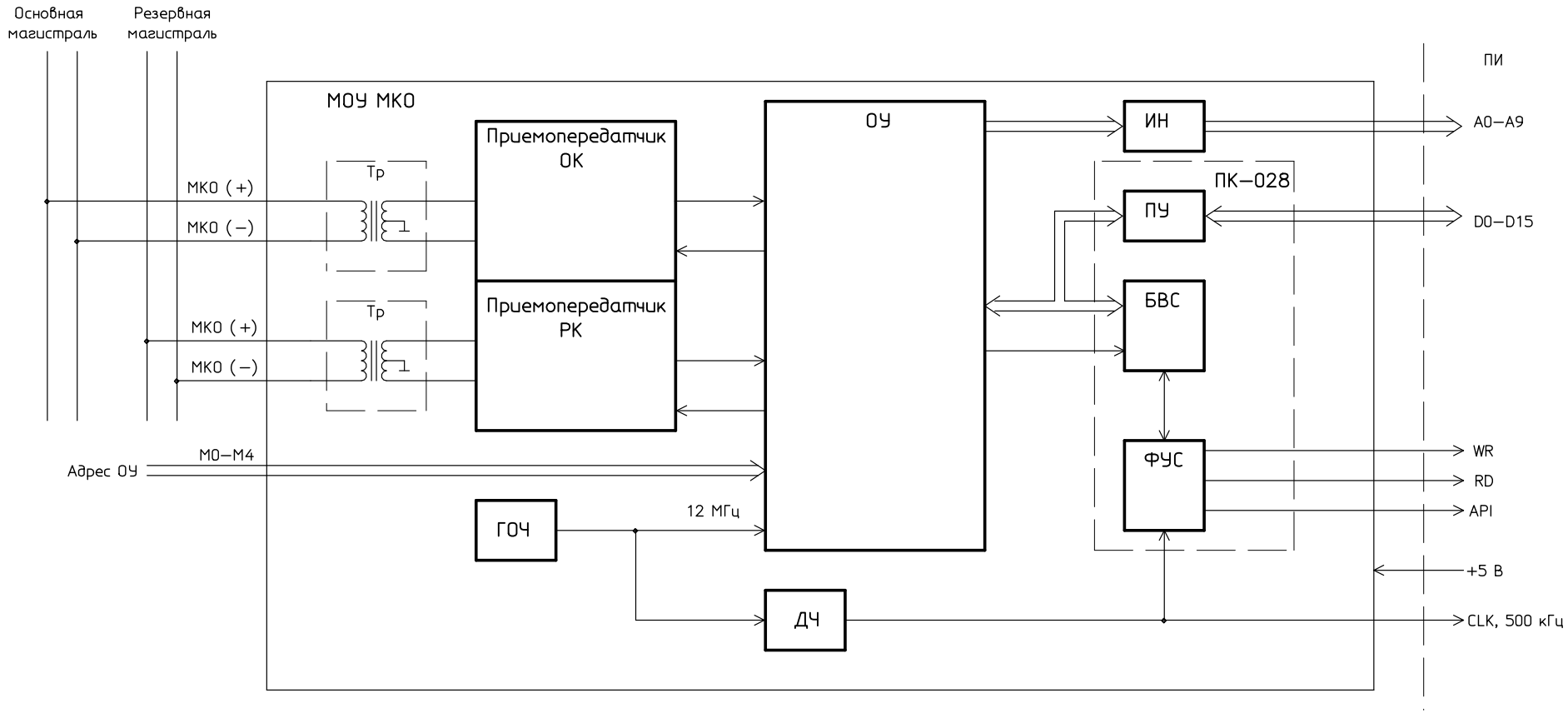


Рис. 3. Структурная схема МОУ МКО (Н1582ВЖ3В-0244): M0−M4 – цепь сигналов установки адреса МОУ МКО; МОУ МКО – модуль оконечного устройства мультиплексного канала обмена; Тр – трансформаторы гальванической развязки; ОК – основной канал; РК – резервный канал; ГОЧ – генератор опорной частоты; ДЧ – делитель частоты; ОУ – оконечное устройство; ИН – инвертор; ПУ – преобразователь уровня; БВС – блок выполнения самоконтроля; ФУС – формирователь управляющих сигналов; A0−A9 – шина адреса; D0−D15 – шина данных; ПИ − параллельный интерфейс; WR – цепь строба записи; RD – цепь строба чтения; API – цепь сигнала активизации шины ПИ; CLK – цепь сигнала тактовой частоты 500 кГц

В режиме записи информации (рис. 6) МОУ МКО выдает во внешнее устройство сигнал активизации шины «API» (после проверки ОУ командного слова на достоверность) и адрес на шину адреса. Разряды адреса A0–A4 образуются в счетчике слов ОУ, A5−A9 – разряды полученного КС (подадрес внешнего устройства). Через время t_2 = 4 мкс ФУС формирует внутренний строб разрешения вывода данных ST для ОУ, МОУ МКО выдает данные на шину D0−D15. Через время t_3 = 6 мкс от начала выдачи сигнала «API» модуль формирует сигнал записи «WR», стробируя передачу данных в выбранное внешнее устройство. После снятия сигнала «API» шина D0−D15 переводится в *Z*-состояние.

В цикле записи МОУ МКО анализирует каждое принятое СД на достоверность с последующей записью во внешнем устройстве.

В цикле чтения (рис. 7) МОУ МКО выдает во внешнее устройство сигнал активизации шины «API» (после проверки ОУ командного слова на достоверность), а на шину адреса «A0−A9» – адрес внешнего устройства. Разряды адреса A0–A4 формируются в счетчике слов ОУ, A5−A9 – разряды полученного КС (подадрес внешнего устройства). Через время t_2 = 6 мкс МОУ МКО формирует сигнал чтения «RD», стробируя передачу данных из внешнего устройства на шину D0−D15. Через время t_3 = 10 мкс от начала выдачи сигнала «API» ФУС формирует строб записи во внутренний буфер ОУ ST, МОУ МКО фиксирует прием данных из внешнего устройства. После снятия сигнала «API» шина D0−D15 переводится в *Z*-состояние.

Разработанные модули мультиплексного канала обмена информацией прошли испытания на соответствие логического протокола обмена и электрических параметров заданным требованиям. В рамках логического протокола проведена проверка выполнения модулем команд управления «Передать ответное слово», «Блокировать передатчик», «Разблокировать передатчик», «Установить оконечное устройство в исходное состояние», «Начать самоконтроль» и других согласно ГОСТ Р 52070−2003. Проверены входные и выходные параметры сигналов, переходные процессы, возникающие в процессе включения, отключения питания, формирования логических уровней и т. д. [15], а также электромагнитная совместимость модуля с внешними устройствами.

Диаграммы работы модуля при получении команд управления «Блокировать передатчик» и «Разблокировать передатчик» показаны на рис. 8. В качестве проверки выполнения данных команд по магистральному интерфейсу отправлялась команда «Передать ответное слово».

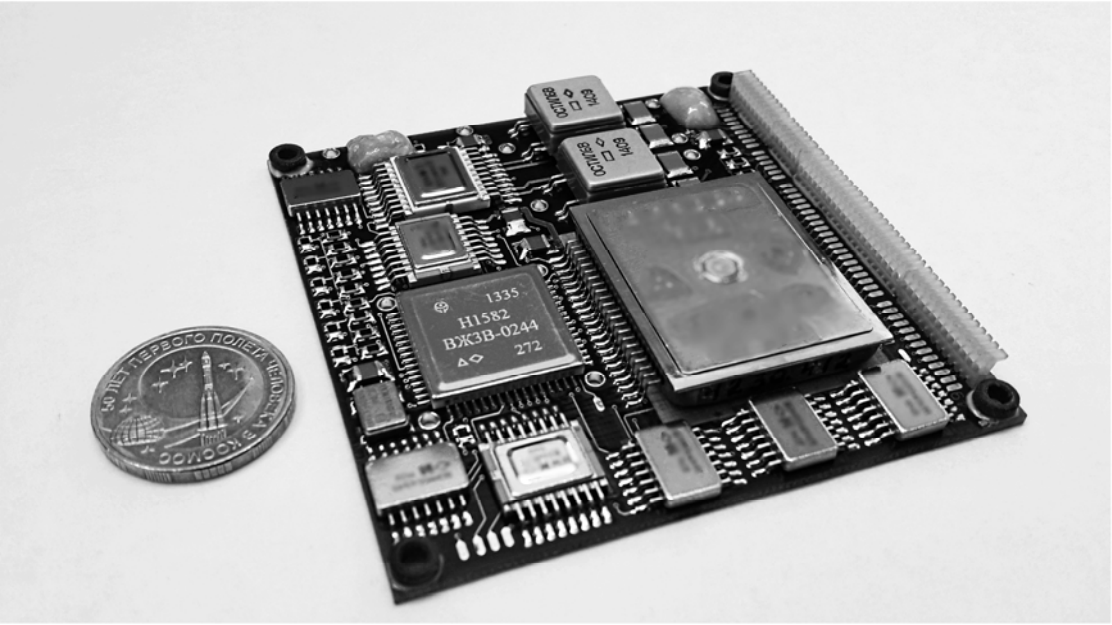


Рис. 4. МОУ МКО на базе СБИС Н1582ВЖ3В-0244

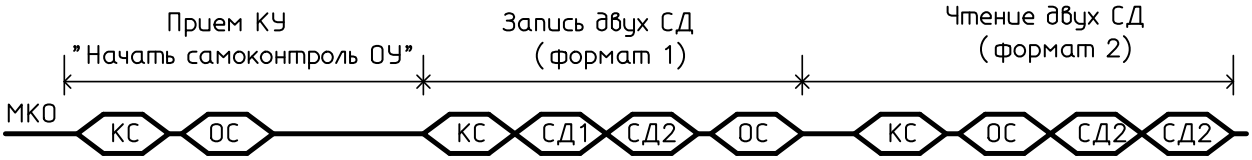


Рис. 5. Временная диаграмма процедуры записи
и чтения в режиме самоконтроля

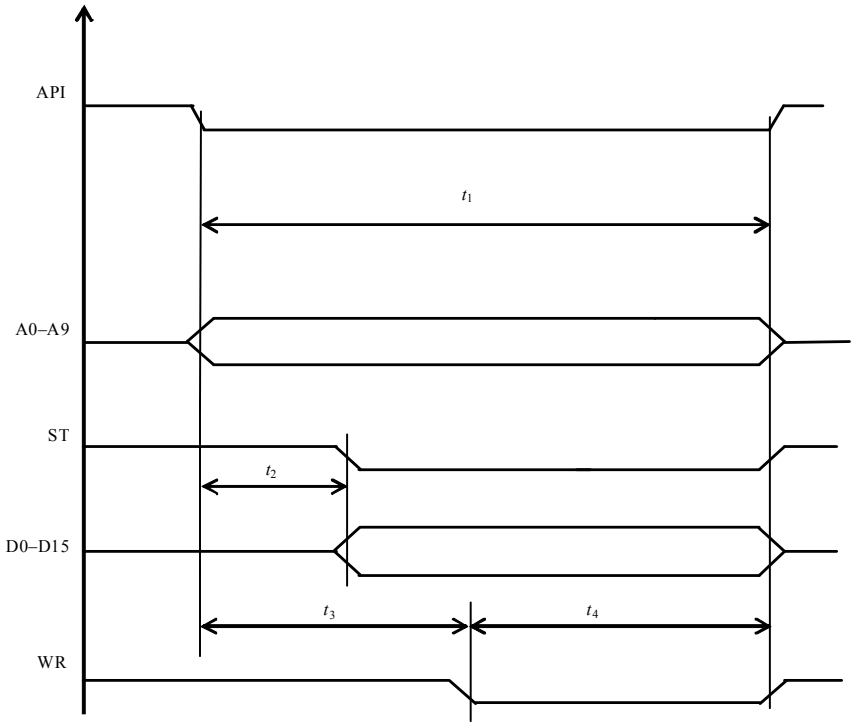


Рис. 6. Временная диаграмма записи одного СД по параллельному интерфейсу:
t_1 = 14 мкс; t_2 = 4 мкс; t_3 = 6 мкс; t_4 = 8 мкс

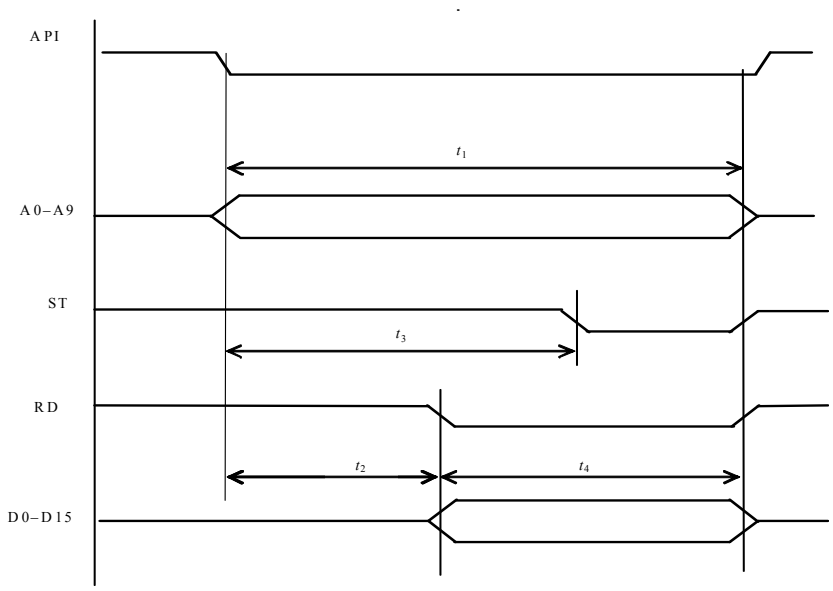


Рис. 7. Временная диаграмма чтения одного СД по параллельному интерфейсу:
t_1 = 14 мкс; t_2 = 6 мкс; t_3 = 10 мкс; t_4 = 4 мкс

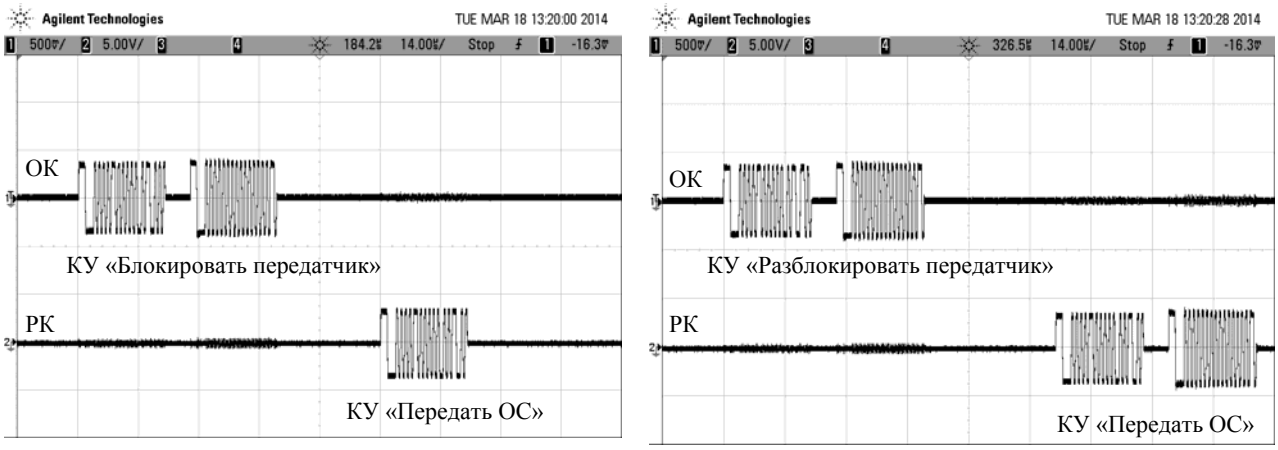
Входные характеристики модуля МОУ МКО проверялись по следующим параметрам:

– размах входного сигнала $U_п$;
– длительность фронта входного сигнала $t_ф$;
– длительность спада входного сигнала $t_с$;
– длительность импульса входного сигнала $t_и$;
– выбросы на вершине входного сигнала b_1, b_2.

Параметры сигналов измерялись при подаче на модуль команды обмена данными на прием информации по магистральной шине (рис. 9). Параметры сигналов приведены в табл. 1.

Проверка выходных характеристик модуля проводилась аналогичным образом, но с командой передачи данных (рис. 10). Параметры выходных сигналов модуля приведены в табл. 2.

Заключение. Из приведенных результатов следует, что разработанный модуль МКО на базе СБИС Н1582ВЖ3В-0244 удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 52070−2003. В табл. 3 даны сравнительные характеристики МОУ МКО на базе СБИС Н1582ВЖ2 и Н1582ВЖ3В, а также модуля производства ОАО «Субмикрон».



а *б*

Рис. 8. Реакция модуля на команду управления «Блокировать передатчик» (*а*), «Разблокировать передатчик» (*б*)

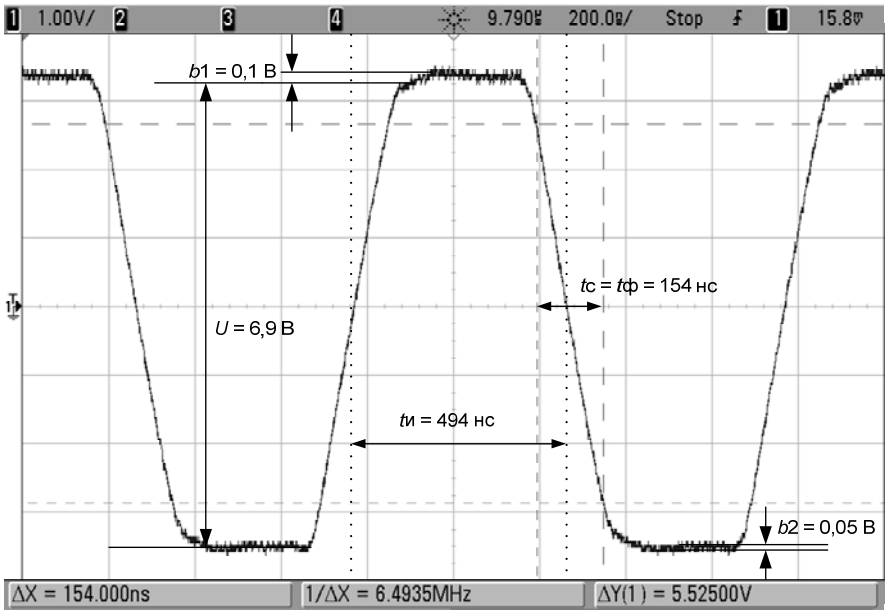


Рис. 9. Входной сигнал, выдаваемый в модуль по линиям МКО

Таблица 1

Результаты проверки входных параметров модуля

Наименование параметра	Значение параметра в соответствии с ГОСТ Р 52070−2003	Значение параметра на основном канале	Значение параметра на резервном канале
Размах входного сигнала $U_п$, В	1,2–20,0	6,9	6,88
Длительность фронта входного сигнала $t_ф$, нс	Не оговаривается	154	167,2
Длительность спада входного сигнала $t_с$, нс	Не оговаривается	154	168
Длительность импульса входного сигнала между точками пересечения нулевого уровня $t_и$, нс	500 ± 150	494	497
	1000 ± 150	996	996
	1500 ± 150	1498	1496,8
	2000 ± 150	1998,6	1991,6
Выброс на вершине входного сигнала b_1, В	Не оговаривается	0,1	0,09
Выброс на вершине входного сигнала b_2, В	Не оговаривается	0,05	0,11

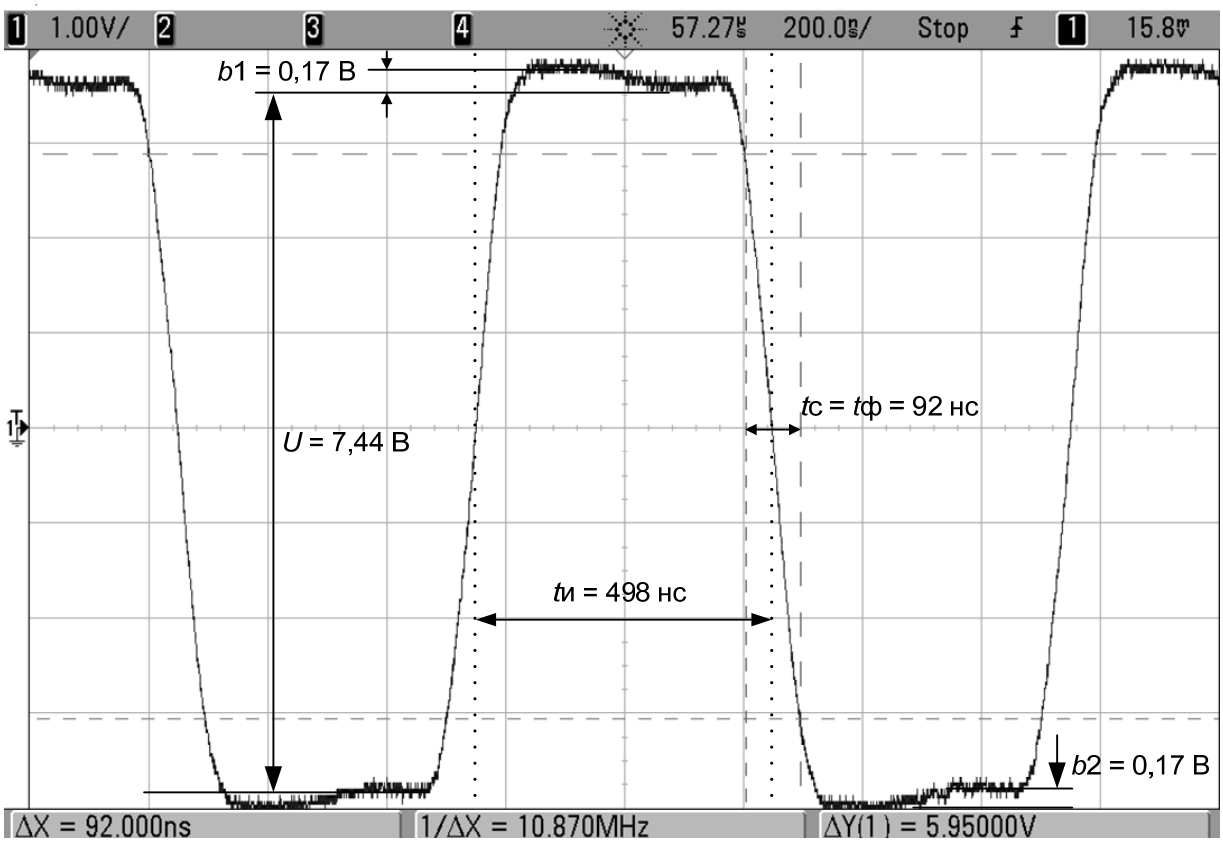


Рис. 10. Выходной сигнал, выдаваемый модулем по линиям МКО

Таблица 2

Результаты проверки выходных параметров модуля

Наименование параметра	Значение параметра в соответствии с ГОСТ Р 52070−2003	Значение параметра на основном канале	Значение параметра на резервном канале
Размах выходного сигнала $U_п$, В	6–9	7,44	7,37
Длительность фронта выходного сигнала $t_ф$, нс	100–300	102,0	113,2
Длительность спада выходного сигнала $t_с$, нс	100–300	102,0	116,1
Длительность импульса выходного сигнала между точками пересечения нулевого уровня $t_и$, нс	500 ± 25	498,0	497,8
	1000 ± 25	998,4	999,2
	1500 ± 25	1496,1	1497,8
	2000 ± 25	1999,2	1998,8
Выброс на вершине выходного сигнала b_1, В, не более	±0,3	0,17	0,16
Выброс на вершине выходного сигнала b_2, В, не более	±0,3	0,17	0,17
Выходное динамическое напряжение сдвига $U_{ост}$, мВ	±90	–47	–49

Таблица 3

Сравнительные характеристики модулей МКО

Характеристика	МО МКО (ОАО «Субмикрон»)	МОУ МКО (Н1582ВЖ2-0361)	МОУ МКО (Н1582ВЖ3В-0244)
Выполняемые команды управления по ГОСТ Р 52070−2003	«Передать ОС», «Блокировать передатчик», «Разблокировать передатчик», «Установить ОУ в исходное состояние», «Начать самоконтроль ОУ»	«Передать ОС», «Блокировать передатчик», «Разблокировать передатчик», «Установить ОУ в исходное состояние», «Передать последнюю команду»	«Передать ОС», «Блокировать передатчик», «Разблокировать передатчик», «Установить ОУ в исходное состояние», «Начать самоконтроль ОУ», «Передать последнюю команду», «Блокировать признак неисправности ОУ», «Разблокировать признак неисправности ОУ»

Окончание табл. 3

Характеристика	МО МКО (ОАО «Субмикрон»)	МОУ МКО (Н1582ВЖ2-0361)	МОУ МКО (Н1582ВЖ3В-0244)
Используемые признаки о состоянии ОУ в ответном слове	«Ошибка в сообщении», «Абонент занят»	«Ошибка в сообщении», «Принята групповая команда», «Неисправность ОУ»	«Ошибка в сообщении», «Запрос на обслуживание», «Принята групповая команда», «Абонент занят», «Неисправность абонента», «Неисправность ОУ», «Принято управление интерфейсом»
Мощность потребления, Вт, не более: – в активном режиме – в неактивном режиме	0,3 (+5 В), 0,6 (+12 В) 0,2	0,9 0,2	0,9 0,3
Масса, г	20 (48*)	65	65
Габаритные размеры, мм	50,5×36,4×5,0 (100×62×13,5*)	75×75×11,8	75×75×11,8

* − с учетом дополнительных ЭРИ, необходимых для работы.

Исходя из приведенной таблицы, можно сделать вывод, что модуль МОУ МКО на базе СБИС Н1582ВЖ3В является усовершенствованной версией модуля МОУ МКО на базе СБИС Н1582ВЖ2. Он выигрывает в габаритных размерах в сравнении с МО МКО, для которого требуются дополнительные ЭРИ и два источника питания, имеет более широкий спектр обрабатываемых команд управления и используемых признаков в ответном слове, а также питается от одного источника напряжения, что упрощает работу. В его составе имеются все необходимые компоненты для автономной работы. В заключение можно сказать, что разработанный модуль оконечного устройства на базе СБИС Н1582ВЖ3В является актуальной альтернативой для применения в устройствах бортовой аппаратуры, использующих в качестве межблочной связи интерфейс магистрального канала обмена информацией (ГОСТ Р 52070−2003).

Библиографические ссылки

1. Лукьянов Л. М., Подлесный Э. С. Использование мультиплексного канала информационного обмена бортовых цифровых вычислительных систем для наземных испытаний космических аппаратов // Вопросы электромеханики : Труды НПП ВНИИЭМ. К 60-летию основания института. 2001. Т. 100. С. 80−88.
2. MIL-STD-1533. [Электронный ресурс]. Tutorial. URL: http://www.aim-online.com/pdf/OVW1553.pdf (дата обращения: 22.10.2014).
3. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 2003. 23 с.
4. Хвощ С. Т., Амаду Х. Х. Промышленные сети на базе стандарта MIL-STD-1553B // Современные технологии автоматизации. 1999. № 1/99. С. 42−45.
5. Хвощ С. Т. Мультиплексные каналы межмодульного обмена корабельных систем. Л. : ЦНИИ «Румб», 1987. 146 с.
6. МО МКО: руководство по эксплуатации / ОАО «НИИ «Субмикрон». ЮШКР.468364.018 РЭ. Зеленоград, 2011. 82 с.
7. Техническое описание БИС 1895ВА1Т [Электронный ресурс] / НТЦ «Модуль». URL: http://module.ru/upload/files/189518.pdf (дата обращения: 22.10.2014).
8. Техническое описание БИС 1879ВА1Т [Электронный ресурс] / НТЦ «Модуль». URL: http://module.ru/upload/files/187970.pdf (дата обращения: 22.10.2014).
9. Техническое описание микросборки 2605ВГ1Т [Электронный ресурс] / НТЦ «Модуль». URL: http://module.ru/upload/files/2605microsborka42.pdf (дата обращения: 22.10.2014).
10. Техническое описание СБИС Н1582ВЖ2-0361 [Электронный ресурс] / НПО «Физика». URL: http://npofizika.ru/pdf/N1582vj2-0361.pdf (дата обращения: 22.10.2014).
11. Техническое описание микросхемы 5559ИН13Т [Электронный ресурс] / НПО «Физика». URL: http://npofizika.ru/pdf/5559in13.pdf (дата обращения: 22.10.2014).
12. Стешенко В., Субботин В. Проблемы обеспечения бортовой аппаратуры космических аппаратов электронной компонентной базой // Компоненты и технологии. 2011. № 11. С. 10−12.
13. Техническое описание СБИС Н1582ВЖ3-0244 [Электронный ресурс] / НПО «Физика». URL: http://npofizika.ru/pdf/TO244.pdf (дата обращения: 22.10.2014).
14. Горюнов А. Г., Ливенцов С. Н., Чурсин Ю. А. Интерфейсы микропроцессорных систем : метод. указ. к выполнению лаб. работ. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 51 с.
15. ГОСТ Р 51765−2001. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Тестирование опытных образцов интерфейсного модуля в режиме оконечного устройства. Общие требования к методам контроля. М. : Изд-во стандартов, 2001. 35 с.

References

1. Luk'yanov L. M., Podlesnyy E. S. [Using data exchange multiplex channel onboard digital computer systems for ground testing of spacecraft]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIIEM. K 60-letiyu osnovaniya instituta*. 2001, vol. 100, p. 80–88 (In Russ.).
2. MIL-STD-1533. Tutorial. Available at: http://www.aim-online.com/pdf/OVW1553.pdf. (accessed 22.04.2014).
3. *GOST R 52070-2003. Interfeys magistral'noy posledovatel'noy sistemy elektronnykh moduley. Obshchie trebovaniya.* [State Standard R 52070-2003. Bus serial

interface of electronic modules system. General requirements.] Moscow, Standardinform Publ., 2003, 23 p. (In Russ.).

4. Khvoshch S. T., Amadu Kh. Kh. [Industrial networks based on the standard MIL-STD-1553B]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii.* 1999, no. 1/99, p. 42–45 (In Russ.).

5. Khvoshch S. T. *Mul'tipleksnye kanaly mezhmodul'nogo obmena korabel'nykh sistem.* [Multiplex channel intermodule exchange ship systems]. Saint-Petersburg, CNII Rumb Publ., 1987, 146 p.

6. *MO MKO. Rukovodstvo po ekspluatatsii, YuShKR.468364.018 RE*. [Operating manual]. JSC “NDI “Submikron”, Zelenograd, 2011, 82 p.

7. *Tekhnicheskoe opisanie BIS 1895VA1T.* [Technical description of LSI circuit 1895VA1T.] STC “Modul'”. Available at: http://module.ru/upload/files/189518.pdf (accessed 22.10.2014).

8. *Tekhnicheskoe opisanie BIS 1879VA1T*. [Technical description of LSI circuit 1879VA1T.] STC “Modul'”. Available at: http://module.ru/upload/files/187970.pdf (accessed 22.10.2014).

9. *Tekhnicheskoe opisanie mikrosborki 2605VG1T*. [Technical description of microassembly 2605VG1T.] STC “Modul'”. Available at: http://module.ru/upload/files/2605microsborka42.pdf (accessed 22.10.2014).

10. *Tekhnicheskoe opisanie BIS N1582Vj2-0361*. [Technical description of LSI circuit N1582Vj2-0361.] NPO “Fizika”. Available at: http://npofizika.ru/pdf/N1582vj2-0361.pdf (accessed 22.10.2014).

11. *Tekhnicheskoe opisanie mikroskhemy 5559IN13T4.* [Technical description of IC 5559IN13T.] NPO “Fizika”. Available at: http://npofizika.ru/pdf/5559in13.pdf (accessed 22.10.2014).

12. Steshenko V., Subbotin V. [Problems of maintenance of the onboard equipment of spacecraft electronic component base]. *Komponenty i tekhnologii*. 2011, no. 11, p. 10–12. (In Russ.)

13. *Tekhnicheskoe opisanie BIS N1582Vj3-0244*. [Technical description of LSI circuit N1582Vj3-0244.] NPO “Fizika”. Available at: http://npofizika.ru/pdf/TO244.pdf (accessed 22.10.2014).

14. Goryunov A. G., Liventsov S. N., Chursin Yu. A. *Interfeysy mikroprotsessornykh sistem: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot*. [Microprocessor systems interfaces: laboratory works guide.] Tomsk, Tomskiy politekhnicheskiy universitet Publ., 2010, 51 p.

15. *GOST R 51765–2001. Interfeys magistral'nyy posledovatel'nyy sistemy elektronnykh moduley. Testirovanie opytnykh obraztsov interfeysnogo modulya v rezhime okonechnogo ustroystva. Obshchie trebovaniya k metodam kontrolya.* [State Standard R 51765-2001. Bus serial interface for system of electronic modules. Validation test-plan for interface module, functioning as remote terminal. General requirements for test methods]. Moscow, Standardinform Publ., 2001, 35 p. (In Russ.).

© Щербаков С. А., Игнатовский В. В., Филонова С. Ю., 2015

Раздел
Part
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

УДК 583.975 + 621.318.1

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 226–232

СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА CoPt(111) ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДОФАЗНЫХ РЕАКЦИЙ

В. С. Жигалов[1*], В. Г. Мягков[1], А. Н. Рыбакова[2], И. А. Турпанов[1], Г. Н. Бондаренко[3]

[1]Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[3]Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[*]E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru

*Исходные Co(001)/Pt(111) плёночные структуры получены последовательным термическим осаждением слоя Co с кубической кристаллической решеткой и Pt(111) из мишени, распыляемой с использованием методики магнетронного распыления на монокристаллическую подложку MgO(001) в вакууме 10^{-6} торр. В экспериментах использовались образцы с 1Co:3Pt и 1Co:1Pt атомным отношением общей толщиной порядка 300 нм. Исходные образцы отжигались в диапазоне температур от 250 до 850 ºС с шагом 50 ºС в течение 40 мин. Рентгеноструктурные исследования показали, что в двухслойных структурах с атомным соотношением реагентов 1/3, при температурах отжига T = 500 и 850 ºС в результате межслойного химического взаимодействия формируются фазы эпитаксиального кубического соединения $CoPt_3$ ($L1_2$) с ГЦК-решеткой (a = 3,856 Å). Отжиги этих же структур с соотношением 1/1 приводят к формированию второй фазы CoPt ($L1_0$) с тетрагональным искажением, которая способствует получению высоких значений константы одноосной магнитокристаллографической анизотропии K_1 и определяет легкое направление намагничивания (ось **c**). Синтезированный образец, состоящий из двух магнитных фаз, имеет намагниченность насыщения, сопоставимую со значением M_S для пленки $L1_2$-$CoPt_3$, плоскостную анизотропию с $K_1 = 5{,}6 \cdot 10^5$ эрг/см^3 и $H_C \sim 10^3$ Э. Вновь сформированная $L1_0$-CoPt-фаза растет эпитаксиально на базе предварительно синтезированной $L1_2$-$CoPt_3$-фазы с тем же ориентационным соотношением. Особенностями пленки с атомным соотношением Co/Pt = = 1/1 при T = 850 ºС является наличие «вращательной» анизотропии, обусловленное обменным взаимодействием двух сформированных упорядоченных фаз CoPt(111) и $CoPt_3$(111) с ферромагнитным порядком, и легкую ось, которую можно переориентировать наложением магнитного поля. Меняя соотношение реагентов в системе, существует возможность изменять последовательность фазообразования.*

Ключевые слова: твердофазный синтез, плёночные образцы, твёрдые растворы, магнитные свойства, кристаллическая структура.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 226–232

STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF CoPt(111) FILMS OBTAINED BY USING SOLID-PHASE REACTIONS

V. S. Zhigalov[1*], V. G. Myagkov[1], A. N. Rybakova[2], I. A. Turpanov[1], G. N. Bondarenko[3]

[1]Kirensky Institute of Physics SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[2]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
[3]Institute of chemistry and chemical technology SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru

The original Co(001)/Pt(111) film structures are obtained by consequent thermal deposition layer with a cubic crystal lattice and Pt(111) from the target, sprayed using a magnetron sputtering technique on a single crystal substrate of MgO(001) in a vacuum of 10^{-6} Torr. In the experiments, samples 1Co:3Pt and 1Co:1Pt atomic ratio of the total thickness of about 300 nm are used. Initial samples were annealed in the temperature range from to 250 ºC to 850 ºC in

increments of 50 for 40 minutes. X-ray diffraction analysis showed that in two-layer structures with the atomic ratio of reagents 1/3, at temperatures of annealing at T = 500 and 850 ºC in the interlayer chemical interaction to form phase epitaxial cubic compounds $CoPt_3$ ($L1_2$) c FCC-lattice (a = 3.856 Å). Annealing of these same structures with 1/1 lead to the formation of the second phase CoPt ($L1_0$) with tetragonal distortion, which helps to ensure a high value of the uniaxial magnetocrystalline anisotropy constant K_1 and determines easy magnetization direction (axis c). Synthesized sample consisting of two magnetic phases is the saturation magnetization, comparable with the value of M_S for the film $L1_2$-$CoPt_3$, planar anisotropy with $K_1 = 5.6 \cdot 10^5$ erg / sm3 and $H_c \sim 10^3$ E. Newly formed $L1_0$-CoPt phase grows epitaxially on the basis of pre-synthesized $L1_2$-$CoPt_3$ phase with the same orientation relationship. The newly formed $L1_0$-CoPt phase grows epitaxially on the basis of pre-synthesized $L1_2$-$CoPt_3$ phase with the same orientation relationship. Features films with atomic ratio of Co / Pt = 1/1 at T = 850 ºC is the presence of "rotational" anisotropy due to the exchange interaction of two ordered phases formed CoPt (111) and $CoPt_3$ (111) with a ferromagnetic order and an easy axis, which can be applied a magnetic field to refocus. By changing the ratio of the reactants in the system, it is possible to change the sequence of phase formation.

Keywords: solid-phase synthesis, film samples, solid solutions, magnetic properties, crystal structure.

1. Введение

Структурные и магнитные свойства тонких плёнок FePd, FePt и CoPt, упорядоченных по типу $L1_0$, широко исследуются в связи с потенциальным использованием их для высокоплотной магнитной записи информации, а также в качестве специальных магнитных сред [1; 2]. Для получения кубических соединений, упорядоченных по типу $L1_2$, или высокоанизотропных фаз $L1_0$ с тетрагональным искажением необходимы продолжительные высокотемпературные отжиги либо высокие температуры синтеза [2; 3]. В результате тетрагонального искажения $L1_0$-фаза обладает большой константой одноосной магнитокристаллографической анизотропии K_1 с легким направлением намагничивания, совпадающим с осью ***c***. В последние годы интенсивно исследуются плёночные сплавы Co_xPt_{1-x}, так как имеют уникальные магнитные и структурные свойства, необходимые для различных практических приложений [4–6]. В CoPt образцах $L1_0$-фаза была обнаружена при отжиге во многих системах, в частности, в пленках интерметаллических сплавов [6], мультислоях [7], подробно исследуются фазовые превращения типа $A1$ (разупорядоченный) $\rightarrow L1_1 \rightarrow A1 \rightarrow L1_0$ [8; 9] и в пленках с текстурой CoPt(111), приготовленных с использованием подслоя Pt(111) [10].

Исходные пленочные образцы для последующего отжига чаще всего изготавливаются методами соиспарения элементов с помощью магнетронного распыления либо приготавливаются в виде мультислойных систем на монокристаллических подложках из MgO(001), MgO(111), Al_2O_3 и др. [8; 9; 11; 12]. Одним из предлагаемых нами способов является использование межслойных химических взаимодействий в двухслойных структурах под воздействием термической обработки [13]. Однако публикаций, связанных с изучением твёрдофазных реакций между элементными Co- и Pt-реагентами, в литературе недостаточно [14]. Кроме того, крайне мало публикаций об условиях формирования и упорядочения CoPt- и $CoPt_3$-фаз, и полностью отсутствуют данные о магнитных свойствах тонких плёнок этих фаз, синтезированных с помощью твердофазных реакций. Полагаем, что важную информацию об условиях формирования и упорядочения CoPt-, $CoPt_3$-фаз в течение роста исходных структур и постростовых отжигов может дать изучение твердофазных реакций между элементными Co- и Pt-реагентами.

В данной работе исследуется твердофазный синтез различных фаз, изготавливаемых путем последовательного отжига двухслойной структуры β-Co(001)/Pt(111) с различным атомным соотношением элементов, осажденных на монокристаллическую подложку MgO. Исследуются процессы формирования фаз в процессе твердофазного синтеза под воздействием термообработки, структурные, магнитные и анизотропные свойства синтезируемых фаз.

2. Образцы и методика эксперимента

Исходные Co(001)/Pt(111) плёночные структуры получены последовательным термическим осаждением слоя Co с кубической кристаллической решеткой и Pt из мишени, распыляемой с использованием методики магнетронного распыления на монокристаллическую подложку MgO(001) в вакууме 10^{-6} торр. В экспериментах использовались образцы с 1Co:3Pt и 1Co:1Pt атомным отношением общей толщиной порядка 300 нм. Осаждение слоёв велось при температуре 250–280 °C, при которой происходил эпитаксиальный рост Co(002) и Pt(111) на MgO(001)-поверхности без протекания твёрдофазной реакции между слоями.

Намагниченность насыщения M_S, константы магнитокристаллической анизотропии и кривые крутящих моментов измерялись в анизометре с максимальным магнитным полем 18 кЭ. Крутящие моменты в плоскости пленки $L_{||}(\varphi)$ приведены на единицу объёма плёнки в относительных единицах. Рентгенофлуоресцентный анализ был использован для определения толщин Co- и Pt-слоев. Идентификация образующихся фаз была проведена на дифрактометре ДРОН-4-07 (CuK_α-излучение). Рентгенографические исследования эпитаксиальной ориентации фаз проведены на дифрактометре PANalytical X'Pert PRO с матричным твердотельным детектором PIXcel. Степень упорядочения (η) фазы $L1_0$-CoPt определялась путем уточнения заполняемости соответствующих атомных позиций Co и Pt в структуре методом полнопрофильного рентгеноструктурного анализа. Все исходные Pt(111)/β-Co(001)/MgO(001) образцы подвергались термическому отжигу в температурном диапазоне от 250 до 850 °C с шагом 50 °C и выдержкой при каждой температуре 40 мин.

3. Результаты эксперимента

Атомное соотношение Co/Pt ≈ 1/3. На рис. 1 представлены дифрактограммы исходного двухслойного образца Co/Pt и дифрактограммы с этого же образца после отжигов при T = 500 и 850 ºС. Исходный образец содержал только рефлексы β-Co(001) и Pt(111) (рис. 1, *а*), что указывает на Pt(111)/Co(001)/MgO(001) эпитаксиальный рост. Анализ рентгеновских измерений показывает, что слои Co и Pt растут в соответствии с ориентационными соотношениями Pt(111)[-110] ‖ β-Co(001)[110] ‖ MgO(001)[001]. Кривая крутящих моментов для исходного образца показала (рис. 2, *а*), что в структуре слой кубического кобальта имеет двухосную анизотропию K_1(β-Co) с лёгкими осями, направленными вдоль [110] и [1-10] подложки MgO(001) и константой ~ 5,0 · 10^5 erg/cm^3, совпадающей с первой константой магнитокристаллографической анизотропии массивного кобальта. Значения коэрцитивной силы H_C ~ 100 Oe, константы K_4 и ориентационные соотношения β-Co[001] ‖ MgO(001)[001] были типичными для Co(002)-плёнок на MgO(001), полученных различными способами [14]. Последующее осаждение Pt-слоя не меняло магнитных характеристик первоначальной кобальтовой плёнки.

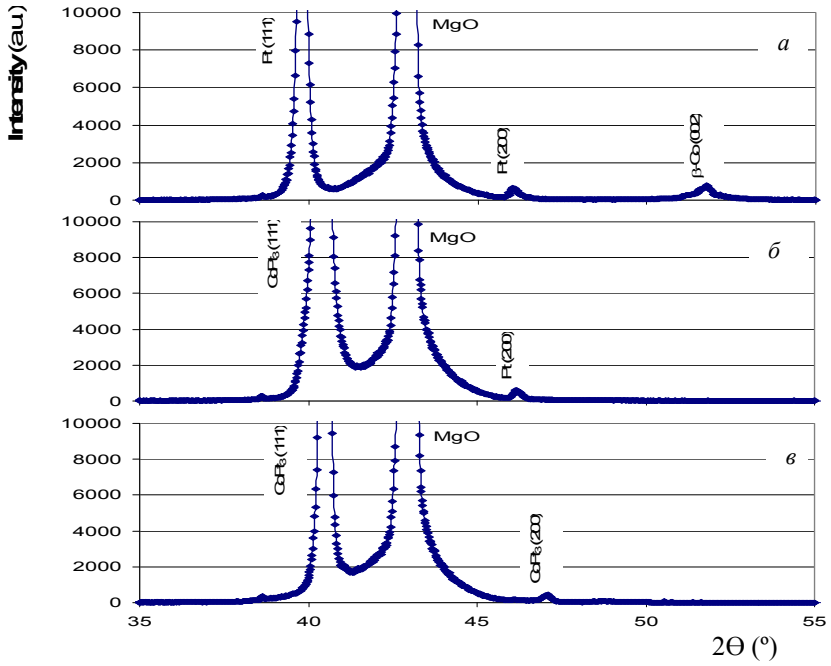


Рис. 1. Формирование кубической фазы $CoPt_3$ при термообработке в двухслойной системе Co/Pt с атомным соотношением элементов 24/76, осажденной на монокристаллическую подложку MgO: слоистая структура MgO(001)/β-Co(001)/Pt(111), изготовленная при температуре подложки (T_S) 250 ºС (*а*); температура отжига слоистой структуры при T_{an} 500 ºС (*б*); температура отжига структуры 850 ºС (*в*)

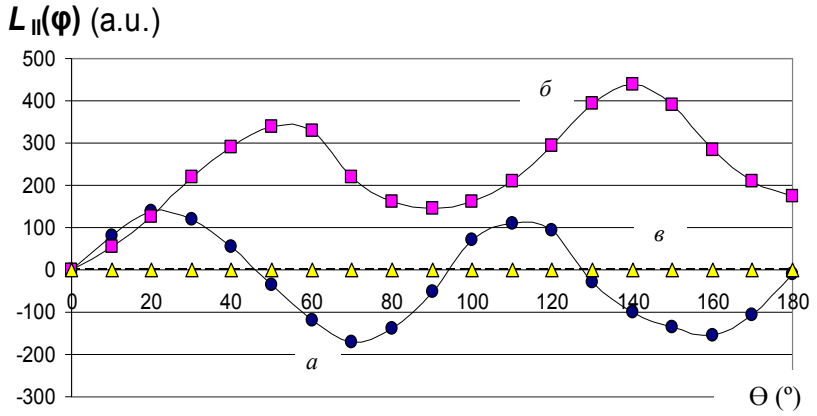


Рис. 2. Эволюция кривых крутящего момента $L_{||}(\varphi)$ в плоскости β-Co(001)/Pt(111)/MgO(001) плёночной системы: исходный образец (*а*), после отжига при T = 500 ºС (*б*) и 850 ºС (*в*)

Отжиги при T = 500 и 850 ºС способствуют формированию пленки эпитаксиального кубического соединения $CoPt_3$ с ГЦК ($Fm3m$)-решеткой, параметр которой составлял величину a = 3,856 Å при отжиге 500 ºС и a = 3,852 Å при отжиге 850 ºС. Небольшая разница в значениях параметра решетки, тем не менее, приводит к значительному различию в магнитных и магнитоанизотропных параметрах синтезированной фазы $CoPt_3$.

На рис. 2, *б*, *в* приведены кривые крутящего момента для двух температур отжига. Отжиг при T = 500 ºС, не меняя характера кривой для исходной пленки, способствует наведению вращательной анизотропии. Это анизотропия, легкую ось которой можно повернуть наложением магнитного поля и которая носит обменный характер [15]. В результате этого кривая крутящих моментов располагается сверху при намагничивании в одном направлении и снизу при намагничивании в другом направлении.

Анализируя полученные данные по параметрам решетки, анизотропным свойствам и рентгеновские спектры (см. рис. 1), можно предположить, что появление вращающейся обменной анизотропии при температуре отжига 500 ºС связано с обменной связью магнитной фазы $CoPt_3$ с непрореагировавшей частью Pt(200), магнитно поляризованной [10]. Отжиг при T = 850 ºС приводит к полному формированию эпитаксиально упорядоченной $CoPt_3$-фазы, максимально ориентированной по направлению [111] (см. рис. 1, *в*). Пленка CoPt(111), отожженная при T = 850 ºС, практически не характеризуется анизотропными свойствами (см. рис. 2, *в*) благодаря тому, что вторая константа магнитокристаллической анизотропии K_2(CoPt(111)) становится близкой к 0.

В пользу предположения о неполном формировании $CoPt_3$-фазы (при T = 500 ºС) свидетельствует зависимость намагниченности насыщения от температуры отжига (рис. 3). Температура отжига в 500 ºС является началом твердофазной реакции, а сформированная при этом фаза имеет намагниченность примерно на 20 % меньше намагниченности исходной структуры.

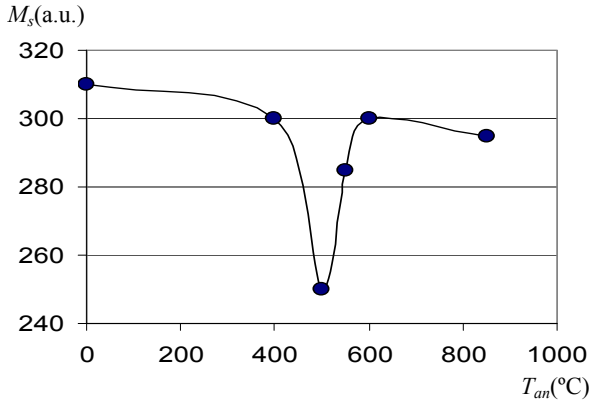


Рис. 3. Зависимость намагниченности насыщения в единицах относительной намагниченности исходной структуры от температуры отжига

Атомное соотношение Co/Pt ≈ 1/1. Для получения кубического соединения CoPt, упорядоченного по типу $L1_0$ с тетрагональным искажением, необходим эквиатомный состав [2]. Упорядоченная $L1_0$-фаза обладает высокими значениями константы одноосной магнитокристаллографической анизотропии K_1, при этом легкое направление намагничивания совпадает с осью ***c***. Необходимый химический элементный состав для формирования $L1_0$-фазы согласно диаграмме состояний был получен путем дополнительного осаждения слоя Co на синтезированные пленки $CoPt_3$ (см. рис 1, *в*) и представлен в таблице. Полученная таким образом структура Co/$CoPt_3$ вновь отжигалась при T = 850 ºС в течение 40 мин.

Химический состав исходных пленок Co/Pt до и после дополнительного нанесения слоя Co

	Было	Стало
Pt	76 at.%	45,3 at.%
Co	24 at.%	54,7 at.%

На рис. 4 показаны рентгеновские спектры синтезированных таким образом образцов. Из рисунка видно, что в исследуемой системе формируются две эпитаксиальные кубические фазы: $L1_2$-$CoPt_3$(111) – $Fm3m$ с параметром решетки a = 3,856 Å и $L1_o$-CoPt(111) – $Pm3m$ с параметром a = 3,755 Å. Ориентационные соотношения относительно граней подложки MgO составляют выражения:

Эпитаксия: CoPt(111)[-110] || MgO(001)[110];
$CoPt_3$(111)[-110] || MgO(001)[110].

Вновь сформированная $L1_0$-CoPt фаза растет эпитаксиально на базе предварительно синтезированной $L1_2$-$CoPt_3$ фазы с тем же ориентационным соотношением. Этот факт характеризует технологическую возможность влияния на рост и формирование нужных соединений с необходимой кристаллографией в данной системе элементов. Синтезированный образец, состоящий из двух магнитных фаз, имел намагниченность насыщения, сопоставимую со значением M_S для пленки $L1_2$-$CoPt_3$ (рис. 3), плоскостную анизотропию с $K_1 = 5{,}6\cdot10^5$ эрг/см^3 и $H_C \sim 10^3$ Ое.

На рис. 5 приведены кривые крутящего момента для синтезированной пленки, имеющей состав, близкий к эквиатомному и отожженной при температуре 850 ºС. Кривая крутящих моментов располагается сверху при намагничивании в одном направлению и снизу при намагничивании в другом направлении, однако в отличие от пленки состава Co/Pt = 1/3 состоит из 12 пиков для обоих направлений намагничивания. Логично предположить, что количество максимумов определяется специфической ориентацией образующихся кристаллов (111) относительно кристаллических плоскостей подложки MgO.

Эпитаксиальные ориентации кристаллитов CoPt(111) и $CoPt_3$(111) были определены с помощью рентгенографических исследований с использованием φ-сканирования. На рис. 6 приведены результаты асимметричного φ-сканирования отражений (113)

от подложки MgO и отражений {311} и {211} от синтезированных фаз CoPt, $CoPt_3$ после отжига при T = = 850 °C. Темные пятна на рис. 6 соответствуют дифракционным отражениям, зарегистрированным при соответствующем угле φ поворота образца вокруг оси, перпендикулярной подложке. При повороте образца на 180º регистрируются 6 затенений, что соответствует числу максимумов на кривой крутящих моментов при намагничивании в одну сторону (рис. 5). Исходя из кристаллографической ориентации сформированных фаз CoPt(111) и $CoPt_3$(111), можно предположить, что рост кристаллитов происходит на базе Pt(111) по диагоналям подложки MgO, как это схематично показано на рис 7.

Отметим, что отжиг пленки с атомным соотношением Co/Pt = 1/1 при T = 850 ºC также способствует наведению вращательной анизотропии, носящей обменный характер, легкую ось которой можно переориентировать наложением магнитного поля. В результате этого кривая крутящих моментов располагается сверху при намагничивании в одном направлении и снизу – при намагничивании в другом. Анализируя полученные рентгеновские спектры (рис. 4) и особенности анизотропных свойств, можно предположить, что появление вращательной анизотропии при температуре отжига 850 ºC обусловлено обменным взаимодействием двух сформированных упорядоченных фаз CoPt(1111) и $CoPt_3$(111) с ферромагнитным порядком [15].

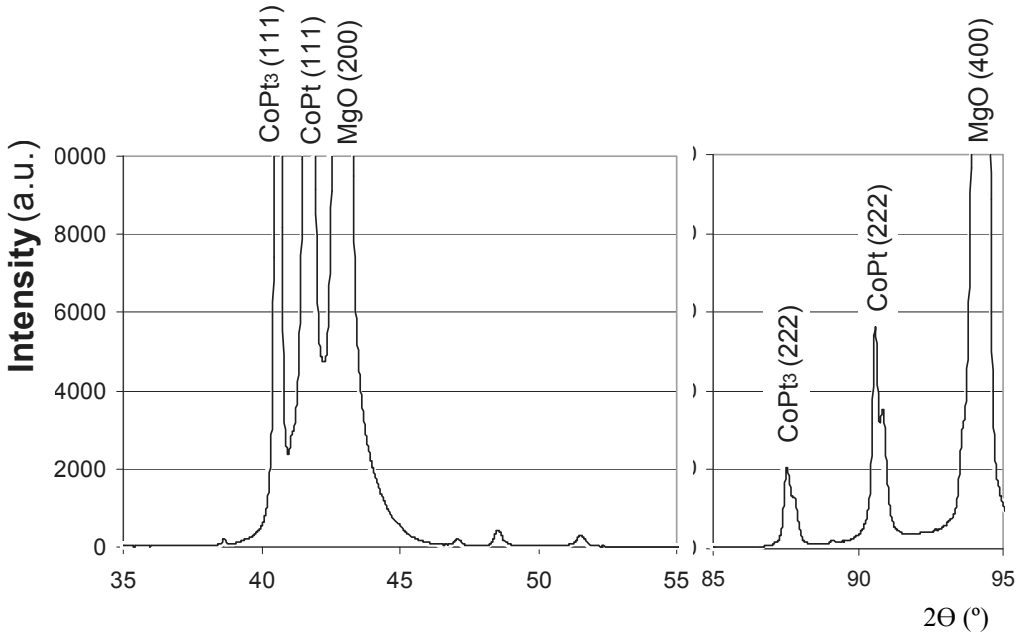


Рис. 4. Формирование кубических фаз в системе Co/$CoPt_3$(111)/MgO
с атомным отношением элементов Pt/Co = 45,3/54,7 после отжига при T = 850 ºC

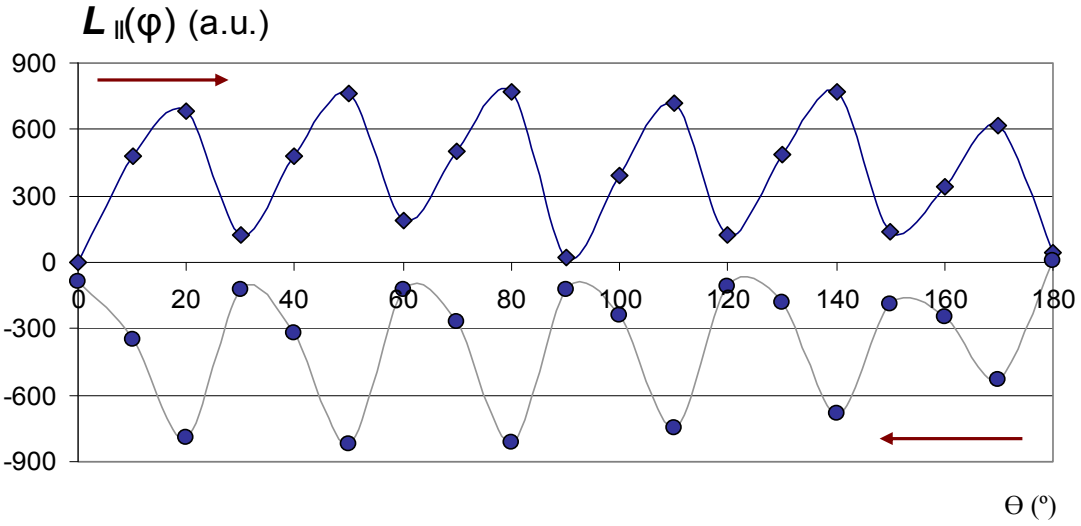


Рис. 5. Кривые крутящих моментов для пленки эквиатомного состава,
отожженной при 850 ºC

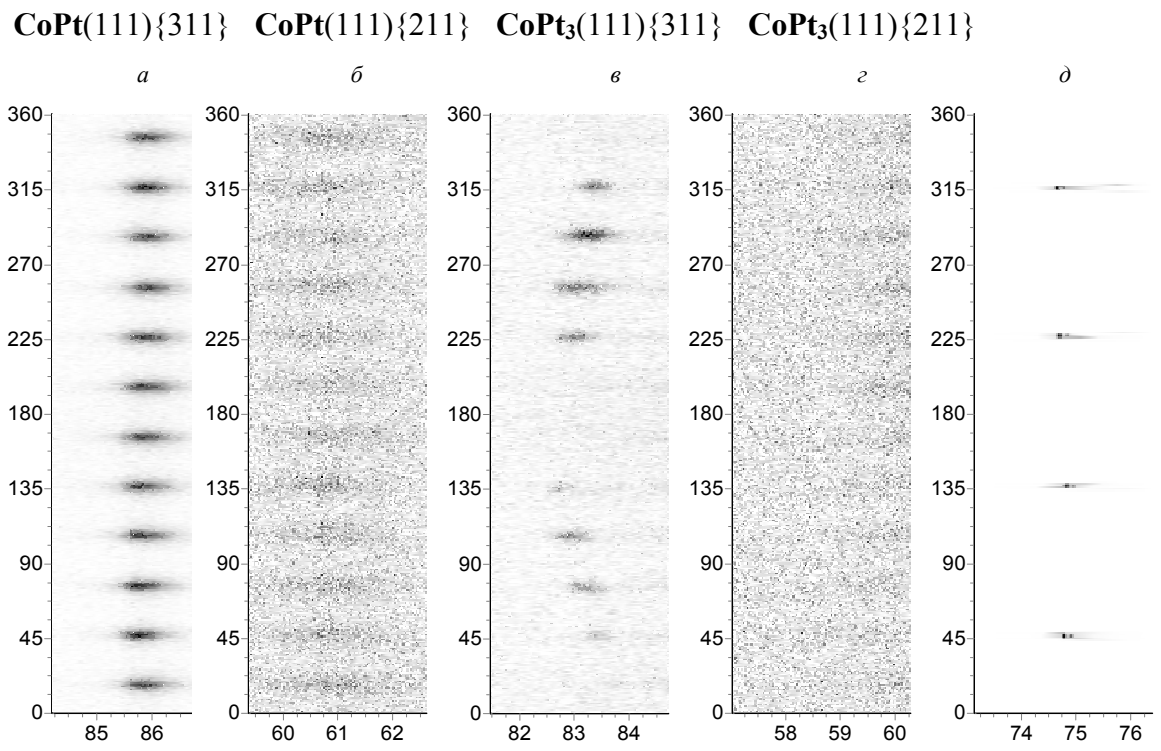


Рис. 6. Результаты асимметричного φ-сканирования отражений {311} {211} от пленки CoPt(111) – (*а*, *б*) и тех же отражений от пленки $CoPt_3$(111) (*в*, *г*), отражения {113} от подложки MgO (*д*). Температура отжига $T_{отж}$ ~ 850 ºС. Темные пятна соответствуют дифракционным отражениям, зарегистрированным при соответствующем угле φ поворота образца вокруг оси, перпендикулярной подложке

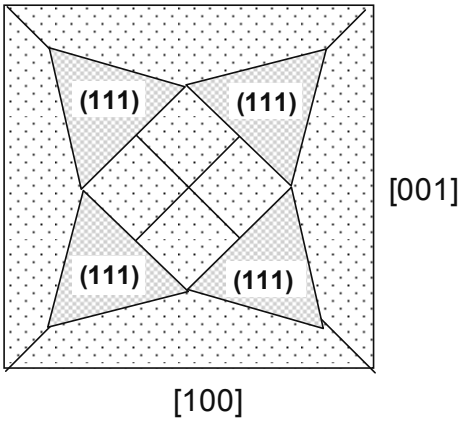


Рис. 7. Схема ориентаций кристаллитов CoPt (111) и $CoPt_3$(111) относительно граней подложки MgO(100)

4. Заключение

По итогам проведенных исследований показано, следующее:

1. В двухслойных пленке β-Co/Pt(111) с атомным соотношением элементов 1/3, осажденной на монокристаллической подложке MgO(001), в результате твердофазной химической реакции при термообработке формируется кубическая фаза $CoPt_3$ с плоскостью (111). Это позволяет предположить, что кобальт диффундирует в платину, кристаллографическая ориентация которой становится определяющей.

2. Добавление к синтезированному образцу $CoPt_3$(111) кобальта до атомного состава Co/Pt = 1/1 способствует формированию высокоанизотропной фазы CoPt при термообработке. При этом ориентация вновь образованной фазы (111) повторяет ориентацию предыдущей. Технологически установлено, что с помощью твердофазного синтеза существует возможность влиять на формирование необходимой фазы с помощью регулирования нужного соотношения атомного состава реагентов и температуры.

3. Анизотропия синтезированных фаз обладает свойствами вращающейся анизотропии, легкая ось которой переключается при смене направления приложенного магнитного поля. Природа эффекта, на наш взгляд, заключается в обменном взаимодействии сформированных магнитных фаз.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №15-02-00948. Авторы статьи выражают благодарность Леониду Александровичу Соловьеву за проведение φ-сканирования.

Acknowledgment. This work was financially supported by RFFI grant No. 15-02-00948. The authors are grateful to Solovyov Leonid Aldeksandrovich for conducting φ-scan.

Библиографические ссылки

1. Interplay between structural and magnetic properties of L1(0)-FePt(001) thin films directly grown on MgO(001) / F. M. Almeida [et al.] // J. of Applied Physics. 2009. P. 105.

2. Size and shape effects on the order–disorder phase transition in CoPt nanoparticles / D. Alloyeau [et al.] // Nature Mater. 2009. P. 940.

3. Influence of cristal structure on the perpendicukar magnetic anisotropy of an epitaxial CoPt alloy / J. C. A. Huang [et al.] // J. of Applied Physics. 1999. P. 85–90.

4. Initial preorder as condition for $L1_0$ ordering in ultrathin CoPt films / L. Reichel [et al.] // J. of Applied Physics. 2013. P. 114.

5. Electric-field control of surface magnetic anisotropy: a density functional approach / H. Zhang [et al.] // New J. Physics. 2009. Vol. 11. P. 51–57.

6. On the relationship of magnetocrystalline anisotropy and stoichiometry in epitaxial $L1_0$ CoPt (001) and FePt (001) thin films / K. Barmak [et al.] / J. of Applied Physics. 2005. P. 98.

7. Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy through reduction of Co-Pt interdiffusion in (Co/Pt) multilayers / S. Bandiera [et al.] // J. of Applied Physics. 2012. Vol. 100. P. 42–47.

8. Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO(111) substretes / A-Ch. Sun [et al.] // Scripta Materials. 2009. P. 61–73.

9. Structural studies of high-Ku metastable CoPt thin fikms with long-range order / Fu-Te Yuan [et al.] // J. of Applied Physics. 2012. P. 111–116.

10. Lin C.-J., Gorman G. L. Evaporated CoPt Alloy films with strong perpendicular magnetic anisotropy // J. of Applied Physics, 1992. P. 1600.

11. Low temperature growth of FePt and CoPt films on MgO(111) substrate / F.-T. Yuan [et al.] // J. of Applied Physics. 2011. P. 109.

12. MBE-Growth of Chemically-Ordered Co-Pt and Fe-Pt Alloy Phases / R. F. C. Farrow [et al.] // The epitaxial growth process. 1994. P.106.

13. Magnetic and Structural Properties of Granular Films Al_2O_3-$FePd_3$ Synthesized by Aluminothermy / В. С. Жигалов [и др.] // Solid State Phenomenon. 2014. P. 215–218.

14. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в эпитаксиальных Pt/Co/MgO(001) тонких пленках / В. Г. Мягков [и др.] // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. С. 937.

15. Суху Р. Магнитные тонкие пленки. М. : Мир, 1967. 175 с.

References

1. Almeida F. M., Planckaert N. et al. Interplay between structural and magnetic properties of L1(0)-FePt(001) thin films directly grown on MgO(001). Journal of Applied Physics. 2009, p.105–110.

2. Alloyeau D., Ricolleau C., Mottet C. et al. Size and shape effects on the order–disorder phase transition in CoPt nanoparticles. Nature Mater. 2009, p. 940.

3. Huang J. C. A., Hsu A. C., Lee Y. H., Wu T. H., Lee C. H. Influence of cristal structure on the perpendicukar magnetic anisotropy of an epitaxial CoPt alloy. *Journal of Applied Physics*. 1999, p. 85–90.

4. Reichel L., Fahler S., Schultz L., Leistner K. Initial preorder as condition for $L1_0$ ordering in ultrathin CoPt films. *Journal of Applied Physics*. 2013, p. 114.

5. Zhang H., Richter M., Koepernic, Opahle I., et al. Electric-field control of surface magnetic anisotropy: a density functional approach. *New Journal Physics*. 2009, vol. 11, p. 51–57.

6. Barmak K., Kim J., Lewis L.H., Coffey K.R. et al. On the relationship of magnetocrystalline anisotropy and stoichiometry in epitaxial $L1_0$ CoPt (001) and FePt (001) thin films. *Journal of Applied Physics*. 2005, p. 98.

7. Bandiera S., Sousa R. S., Rodmacg B., Dieny B. Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy through reduction of Co-Pt interdiffusion in (Co/Pt) multilayers. *Journal of Applied Physics*. 2012, vol. 100, p. 42–47.

8. Sun A.-Ch.., Yuan Fu.-Te., Hsu J.-H., Lee H. Y. Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO(111) substretes. *Scripta Materials*. 2009, p. 61–73.

9. Yuan Fu.-Te., Hsu J.-H., Lin Y.-H., Hsiao S. N., Lee H. Y. Structural studies of high-Ku metastable CoPt thin fikms with long-range order. *Journal of Applied Physics*. 2012, p. 111–116.

10. Lin C.-J., Gorman G. L. Evaporated CoPt Alloy films with strong perpendicular magnetic anisotropy. *Journal of Applied Physics*. 1992, p. 61.

11. Yuan F.-T., Sun A. C., Mei J.-K., Liao W. M. et al. Low temperature growth of FePt and CoPt films on MgO(111) substrate. *Journal of Applied Physics*. 2011, p. 109.

12. Farrow R. F. C., Harp G., Weller D., Marks R. F., Toney M. F., Gebollada A. MBE-Growth of Chemically-Ordered Co-Pt and Fe-Pt Alloy Phases. *The epitaxial growth process*. 1994, p. 106.

13. Zhigalov V. S., Myagkov V. G., Semyachkov V. A. Magnetic and Structural Properties of Granular Films Al2O3-FePd3 Synthesized by Aluminothermy. *Solid State Phenomenon*. 2014, p. 215–218.

14. Myagkov V. G., Lee L. A., Bykova L. E., Turpanov I. A. [Self-propagating high temperature synthesis in epitaxial Pt / Co / MgO (001) thin films]. *Fizika tverdogo tela.* 2000, vol. 42, p. 937 (In Russ.).

15. Sukhu R. *Magnitnye tonkie plenki* [Magnetic thin film]. Moscow, Mir, 1967, 175 p.

© Жигалов В. С., Мягков В. Г., Рыбакова А. Н., Турпанов И. А., Бондаренко Г. Н., 2015

УДК 621.762:539.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 233–240

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОПОРОШКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Г. Г. Крушенко[1*], В. П. Назаров[2], М. В. Резанова[2]

[1]Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: genry@icm.krasn.ru

Известно, что с увеличением степени измельчения структурных составляющих сплавов повышаются механические свойства получаемых их них изделий. Отмечается, что достаточно большое количество деталей, комплектующих изделия машиностроения, производится с помощью литейного производства, в связи с присущими этому способу преимуществами по сравнению с другими технологиями изготовления деталей, наиболее значимое из которых – относительная простота технологии, тем не менее позволяющая получать сложные по конфигурации детали, которые практически невозможно изготовить другими способами, при одновременном обеспечении требуемых технической документацией характеристик. К таким деталям, в частности, относятся литые детали, которые входят в состав узлов, механизмов и машин транспортного машиностроения. При этом в этой отрасли, особенно в аэрокосмическом машиностроении, большое распространение получили алюминиевые литейные сплавы. При изготовлении литых деталей одним из основных способов повышения качества является модифицирование, суть которого заключается во введении в жидкий металл веществ, которые служат либо центрами кристаллизации, либо блокируют рост формирующихся кристаллических образований. К настоящему времени «измельчающие» возможности применяющихся средств модифицирования достигли своего предела. И в последние годы для этой цели находят применение более эффективные модификаторы в виде нанопорошков тугоплавких высокопрочных химических соединений (нитриды, карбиды, оксиды, бориды и др.), применение которых приводит к существенному повышению механических свойств литых изделий. Приводятся примеры применения наномодифицирования при изготовлении из алюминиевых сплавов литых деталей транспортных средств, а также использования нанопорошков при сварке, процессы которой практически идентичны с литейными.

Ключевые слова: транспортное машиностроение, литейное производство, сварка, модифицирование, нанопорошки.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 233–240

THE USE OF THE NANOPOWDER TECHNOLOGY IN THE MANUFACTURE OF ALUMINUM ALLOYS PARTS VEHICLES

G. G. Krushenko[1*], V. P. Nazarov[2], M. V. Rezanova[2]

[1]Institute of Computational Modeling SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[2]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
[*]E-mail: genry@icm.krasn.ru

It is known that with increasing fineness of the structural components of the alloys the mechanical properties of the obtained products are increased. It is noted that a sufficiently large parts, components engineering products, produced by the foundry, due to inherent in this method advantages compared with other technologies for the manufacturing of parts, the most significant of which is the relative simplicity of the technology, however, allows to obtain a complex configuration details, which are almost impossible to produce by other methods, while ensuring the required technical documentation characteristics. These details, in particular, are cast parts, which are parts of the components, mechanisms and machinery transport machinery. However, in this industry, especially in aerospace engineering, widespread aluminum die casting alloys has received. In the manufacture of cast parts one of the main ways of improving quality is a modification, the essence of which consists in the introduction into the molten metal substances, which serve either as crystallization centers, or block the growth of emerging crystalline formations. To date, the "chopping" the possibilities of applying the means of modification, has reached its limit. And in recent years for this

purpose there are more effective modifiers in the form of nanopowders of refractory high-strength chemical compounds (nitrides, carbides, oxides, borides, and others), the application of which leads to a significant enhancement of the mechanical properties of molded products. The paper presents examples of the application of nanpowders in the manufacture of aluminum alloys castings vehicles, as well as their use during welding, a process which is almost identical with the casting.

Keywords: transport engineering, foundry, welding, modification, nanopowders.

Введение. Многочисленными исследованиями установлено, что с увеличением степени измельчения структурных составляющих сплавов повышаются механические свойства получаемых их них изделий. Такое поведение поликристаллических металлов в большом диапазоне структурных составляющих хорошо описывается классическим соотношением Холл-Петча (Hall-Patch dependence) [1; 2]:

$$H_\nu(\sigma_T) = H_0(\sigma_0) + \frac{k}{\sqrt{D}},$$

где H_ν – 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 при уменьшении размера зерна D происходит рост прочности материала.

Следует при этом отметить, что достаточно большое количество деталей, комплектующих изделия машиностроения, производится с помощью литейного производства, в связи с присущими этому способу преимуществами по сравнению с другими технологиями изготовления деталей, наиболее значимое из которых – относительная простота технологии, тем не менее позволяющая получать сложные по конфигурации детали, которые практически невозможно изготовить другими способами, при одновременном обеспечении требуемых технической документацией характеристик [3]. К таким деталям, в частности, относятся литые детали, которые входят в состав узлов, механизмов и машин транспортного машиностроения.

Литейные сплавы системы Al–Si. При этом в данной отрасли, особенно в аэрокосмическом машиностроении, большое распространение получили алюминиевые литейные сплавы системы Al–Si (силумины) доэвтектического и эвтектического состава, легированные различными добавками, назначение которых заключается в обеспечении предусмотренных технической документацией механических свойств и, как результат, требуемых эксплуатационных характеристик литых деталей.

Согласно ГОСТ 1583–93 «Сплавы алюминиевые литейные» [4] алюминиево-кремниевые сплавы относятся к славам I группы, основой которых является алюминий, а вторым компонентом – кремний при его содержании от 4,5–6,5 мас. % (сплав АК5М7) до 11,0–13,5 мас. % (сплав АК13), при содержании магния от 0,1–0,2 мас. % (сплав АК13) до 0,1–0,5 мас. % (сплав АК10Су). В состав некоторых из них дополнительно входит марганец – от 0,01–0,5 мас. % (сплав АК13) до 0,3–0,6 мас. % (сплав АК10Су), в состав других входит титан – от 0,15 мас. % (сплав АК9пч) до 0,08–0,15 мас. % (сплав АК7пч). Кроме того, в состав сплава АК10Су входит 0,1–0,25 мас. % сурьмы, а в сплавы АК9пч, АК8л, АК7 и АК7пч – 0,15–0,4 мас. % бериллия. В зависимости от вида легирующих добавок, способа литья и режима термической обработки для указанных сплавов имеет место достаточно широкий разброс прочностных (временное сопротивление разрушению $\sigma_в$: от 150 до 210 МПа; твердость по Бринеллю НВ – от 50 до 90 единиц) и пластических (относительное удлинение δ – от 0,5 до 6,0 %) характеристик (табл. 1), что позволяет выбрать нужную марку сплава в зависимости от того, в каких условиях будет работать изготовляемая из него литая деталь. При этом важными характеристиками сплавов являются литейные свойства сплавов [5], такие как жидкотекучесть (воспроизводимость полости формы затвердевшим металлом), склонность к газопоглощению и трещинообразованию и др., а также обрабатываемость резанием [6].

Таблица 1

Механические свойства литейных сплавов системы Al–Si [4]

Сплав	Временное сопротивление разрушению $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Твердость по Бринеллю НВ, единиц
АК12	150–160	1,0–4,0	50,0
АК13	180	1,5	60,0
АК9	160–250	0,5–1,5	60,0–90,0
АК9с	150–240	1,5–3,5	50,0–70,0
АК9ч	150–240	1,5–3,0	50,0–70,0
АК9пч	160–270	2,0–4,0	50,0–70,0
АК8л	180–340	1,0–6,0	70,0–90,0
АК7	130–200	0,5–1,0	60,0–75,0
АК7ч	140–300	1,0–5,0	45,0–70,0
АК10Су	170	1,0	70,0
АК5М2	120–210	0,5–2,0	65,0–75,0

При изготовлении литых деталей основными технологическими факторами, определяющими их качество, являются термовременные режимы плавки, которые должны обеспечивать максимальную гомогенизацию жидкого металла (разрушение тугоплавких интерметаллидов, повышение однородности распределения компонентов), и такие виды обработки жидкого металла, как рафинирование (дегазация – удаление газов) и модифицирование (введение в жидкий металл дополнительных центров кристаллизации). В настоящей работе акцент сделан на описание результатов применения модифицирования сплавов нанопорошками при производстве литых деталей, используемых в транспортных средствах.

Модифицирование. При получении литых деталей особенно важное значение придается такому виду обработки расплава, как модифицирование [7–9], суть которого заключается во введении в жидкий металл небольших количеств веществ, которые служат либо центрами кристаллизации, либо блокируют рост формирующихся кристаллических образований. В ряде случаев в результате имеют место оба процесса в такой последовательности: зарождение центров кристаллизации → блокирование роста кристаллов. Применяется значительное количество веществ и способов выполнения этого процесса, но суть их всех заключается во введении в жидкий металл частиц, служащих по первому механизму – либо самостоятельными центрами кристаллизации («прямое» гетерогенное зародышеобразование), либо образующих таковые в результате взаимодействия с расплавом, а по второму механизму – блокирующих рост возникающих в затвердевающем расплаве кристаллических образований. В результате модифицирования измельчается либо макрозерно, либо структурные составляющие на микроуровне (возможно и сочетание обоих процессов), включая изменение геометрии выделений интерметаллических фаз с иглообразной, вызывающей возникновение концентрации напряжений и развитие трещин, на глобулярную или близкую к ней, что предотвращает опасность возникновения трещин. Результатом модифицирования металлических композиций является улучшение технологических свойств на стадии получения литых изделий, а также увеличение прочностных и пластических характеристик готовых изделий.

К настоящему времени «измельчающие» возможности применяющихся средств модифицирования, которые сводятся к введению в жидкий металл модификаторов в виде лигатур (промежуточный сплав, состоящий из основы – компонента, идентичного основному компоненту модифицируемого сплава + модифицирующая добавка), достигли своего предела. И в последние годы для этой цели находят применение более эффективные модификаторы в виде нанопорошков (НП) тугоплавких высокопрочных химических соединений (нитриды, карбиды, оксиды, бориды и др.) [10–12]. Нанопорошки представляют собой кристаллические или аморфные образования с размерами частиц, не превышающими 100 нм (1 нм = 10^{-9} м), которые обладают уникальными физико-химическими и механическими свойствами, существенно отличающимися от свойств материалов того же химического состава в массивном состоянии, и эти свойства могут в определенной степени передаваться получаемым из них или с их участием изделиям. Причина уникальности свойств НП заключается в том, что количество атомов в их поверхностном слое и в объеме оказывается соизмеримым [13; 14]. Ввиду того, что атомы на поверхности наночастиц имеют соседей только с одной стороны, их равновесие нарушается и происходит структурная релаксация, которая приводит к смещению межатомного расстояния в слое толщиной в 2–3 нм. Поэтому поверхностные слои наночастиц оказываются растянутыми, а внутренние сжатыми, так как избыточное лапласовское давление [15] на них ($P = 2\gamma/ r$, где γ – поверхностное натяжение; r – радиус наночастицы) достигает сотен килобар, что приводит к существенному искажению кристаллической решетки и, как результат, к тому, что это влияет на энергию активации большинства процессов, в которых они участвуют, меняя их привычный ход и последовательность [13; 16], что оказывает влияние на характеристики изделий, изготовляемых с их применением.

Основателем нанотехнологического направления можно считать известного физика, лауреата Нобелевской премии Р. Фейнмана, который в 1959 г. в своей знаменитой лекции, известной под названием «Там внизу еще много места» (There's plenty of room at the bottom) [17] указал на возможные значительные перспективы конструирования в масштабе атомов и молекул, которые могут быть достигнуты в результате получения материалов и устройств в атомно-молекулярном масштабе, и отметил, что для управления свойствами этих малых наноструктур, необходимо будет создать новый класс миниатюрного инструментария.

Впервые дал определение термину «нанотехнология» Н. Танигучи из Токийского университета в докладе, сделанном в 1974 г. на конференции Японского общества точного машиностроения о грядущем переходе к обработке с ультравысокой точностью [18] как технологии, обеспечивающей достижение чрезвычайно высокой точности и ультратонких размеров – порядка 1 нм. Дословно он дал такое определение термину «нанотехнология»: «Нанотехнология в основном заключается в разделении, объединении и деформации материалов размером в один атом или одну молекулу».

Однако при этом по данным [19] исторический приоритет в получении и использовании ультрадисперсных систем (или наносистем) принадлежит России. Именно в России (СССР) еще в 1950-е гг. на предприятиях атомной промышленности впервые в мире были получены ультрадисперсные порошки металлов с размером частиц около 100 нм, которые были успешно применены при изготовлении мембран для установок диффузионного разделения изотопов урана. А в 1960-е гг. в Институте химической физики АН СССР был разработан левитационный способ (испарение с последующей конденсацией) получения ультрадисперсных порошков. В 1970-е гг. с помощью методов электрического взрыва проводников и плазмохимического синтеза ассортимент ультрадисперсных

порошков был существенно расширен, и в эти же годы появились открытые публикации о различных способах получения и о необычных свойствах малых частиц. В 1980-е гг. был разработан химико-металлургический метод получения ультрадисперсных порошков. Выход нескольких монографий и большого числа научных статей в конце 1970-х – начале 1980-х гг. сформировал в СССР новое научно-техническое направление – ультрадисперсные системы.

Способ введения нанопорошков в жидкий металл. Опыт показал, что существующие способы введения в металлические расплавы порошкообразных добавок, размеры частиц которых находятся в микрометровом диапазоне, не могут 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 для выполнения роли центров кристаллизации, они плохо смачиваются жидким металлом, что снижает вероятность их зародышеобразующей возможности. 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. В связи с этим был разработан принципиально новый способ введения НП в жидкий металл [20; 21], который предотвращает прямой контакт частиц НП с атмосферой и при этом обеспечивает их дозированное введение в жидкий металл.

Суть разработанного способа заключается в следующем. В тонкостенный алюминиевый контейнер засыпали нанопорошок и 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. Отверстие в контейнере закрывали алюминиевой крышкой и производили ее завальцовку. После чего этот контейнер либо помещали в контейнер гидравлического пресса и с усилием прессования 100–120 тс со скоростью 3,5 см/с производили прессование прутков диаметром от 5 до 9,5 мм. 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.

Наномодифицирование сплавов системы Al–Si. Применение НП для модифицирования изученных промышленных сплавов при литье в кокиль показало, что все их виды приводят к росту механических свойств. Так, в результате введения в жидкий сплав АК12 после модифицирования тройным модификатором: а) НП карбида ванадия VC повышает $\sigma_в$ по сравнению с модифицированием стандартным тройным модификатором (25 % NaF + 62,5 % NaCl + 12,5 % KCl) до 228 МПа (на 3,2 %), δ – до 12,9 % (в 4,4 раза); б) смесь НП 25 % BN + 75 % B_4C повышает $\sigma_в$ до 231 МПа (на 4,5 %), δ – до 13,5 % (в 4,7 раза). Модифицирование сплава АК9ч НП карбонитрида титана TiCN дает $\sigma_в$ = 246 МПа, δ = 11,0 %, а НП карбида бора B_4C – $\sigma_в$ = 235 МПа, δ = 12,8 % (по ГОСТ требуется $\sigma_в \geq 235$ МПа, $\delta \geq 3{,}0$ %). На сплаве АК7ч введение после тройного модификатора: а) НП карбида ванадия VC дает $\sigma_в$ = 234 МПа, δ = 14,5 %; б) НП карбида бора B_4C соответственно – 194 МПа и 9,8 %; в) смесь 25 % НП VC и 75 % B_4C – 280 МПа и 13,8 % (по ГОСТ – $\sigma_в \geq 210$ МПа, $\delta \geq 2{,}0$ %). На сплаве АЛ11 при модифицировании тройным модификатором $\sigma_в$ = = 227 МПа, δ = 2,9 %, а дополнительное введение НП TiCN повышает эти характеристики соответственно до 284 МПа (на 2,5 %) и до 4,1 % (в 1,4 раза) при требуемых ГОСТ $\sigma_в \geq 210$ МПа и $\delta \geq 1{,}0$ %. При работе со сплавом АК7 при модифицировании тройным модификатором $\sigma_в$ = 205 МПа, δ = 3,6 %, а в результате дополнительного введения НП VCN $\sigma_в$ возрастает до 217 МПа (на 5,6 %), а δ – до 6,8 % (в 1,9 раза), НП сфенциркона (смесь окислов $Zr0_2$, Nb_20_5, TiO_2) – соответственно до 246 МПа (на 19,3 %) и до 5,8 % (в 1,6 раза). В другой серии исследований, когда модифицирование сплава АК7 производили известным модификатором – фторцирконатом калия K_2ZrF_6, $\sigma_в$ составило 246 МПа, δ – 17,1 %, а дополнительное введение: а) лигатуры Al–Ti и НП TiCN повышает эти характеристики соответственно до 256 МПа (на 4,1 %) и до 25,3 % (в 1,5 раза); б) НП B_4C – соответственно до 264 МПа (на 7,3 %) и до 22,5 % (в 1,3 раза). По ГОСТ требуется $\sigma_в \geq 160$ МПа и $\delta \geq 0{,}5$ %.

Наномодифицирование сплавов системы Al–Si при литье детали типа «корпус агрегата». При литье детали типа «корпус агрегата», представляющей собой сложную фасонную отливку с чистовой массой 5,8 кг, сплав АК12 готовили по одному варианту по серийной технологии с модифицированием стандартным тройным натрийсодержащим модификатором (50 % NaCl, 30 % NaF, 10 % Na_3AlF_6), по другому варианту сплав модифицировали 0,8–0,9 % тройного модификатора (меньше стандартного количества в 1,6–1,9 раза), затем в него дополнительно вводили 0,05–0,08 % НП карбида бора B_4C. Анализ результатов испытаний механических свойств вырезанных из отливок образцов показал, что в результате дополнительного введения НП B_4C повышается $\sigma_в$ по сравнению с обычной технологией с 221 до 231 МПа (на 4,3 %), твердость НВ – в 1,8 раза (с 61,7 до 62,8 МПа) и δ – с 2,9 до 10,5 % (в 3,6 раза). Микроструктура в обоих случаях, хотя и являлась типичной для хорошо модифицированного силумина, в котором эвтектика представляет собой конгломерат тонко измельченных фаз, однако если при обработке расплава только тройным модификатором средняя длина ветвей первого порядка дендритов α-твердого раствора составляет около 90 мкм, то при комплексном, двойном модифицировании они уменьшились до около 35 мкм (меньше в 2,57 раза), а количество дендритов на одной и той же

площади шлифа оказалось в 1,7 раза больше, чем при модифицировании тройным модификатором – соответственно 1084 и 638. Было установлено также и существенное отличие в характере макроструктуры. Так, если при модифицировании тройным модификатором структура характеризуется столбчатым строением, то в результате дополнительного введения в расплав НП B_4C формируется однородная измельченная структура. Очевидно, повышение механических свойств сплава при модифицировании НП B_4C следует связать с измельчением его микро- и макроструктуры. Высокие свойства ($\sigma_в$ = 204 МПа, δ = 5,2 %, НВ = 592,5 МПа) были получены также при модифицировании только B_4C. Гидроиспытания механически обработанных деталей на герметичность показали, что при их литье из модифицированного НП сплава снижается склонность к трещинообразованию, что выражается в повышении давления, при котором на деталях появляется течь или возникают трещины.

Наномодифицирование Al–Si сплава при литье детали типа «обтекатель». Объектом исследования послужила деталь транспортного средства типа «обтекатель», имеющая форму пустотелого конуса (∅ 533 мм, *h* = 850 мм; черновая масса 25 кг, чистовая – 14,5 кг) со сложной конфигурацией внутренней стенки, к механическим свойствам которой предъявляются повышенные требования в связи с тем, что эти детали работают в экстремальных высоконагруженных условиях. Деталь получали литьем в кокиль из специального алюминиево-кремниевого сплава (8,0–10,0 мас. % Si), легированного медью (1,4–1,9 мас. %) и магнием (0,35–0,65 мас. %) с добавкой до 0,50 мас. % НП нитрида бора BN, содержащегося в прутке. Внутренняя поверхность отливки оформлялась с помощью песчаного стержня, внутри которого располагалась литниково-питающая система. Из одной плавки заливали по три детали и одновременно заливали в кокиль по три пробы-свидетеля, из которых впоследствии после термообработки в одной садке с деталями вырезали образцы для испытания механических свойств.

Специфика изготовления детали заключалась в применении нестандартного режима термической обработки, который состоял:

– из двухступенчатой закалки: нагрев до (505 ± 5) ºС, выдержка 2 ч; последующий нагрев до (525 ± 5) ºС, выдержка 8 ч; охлаждение 15 мин в проточной воде; при этом длительность переноса из закалочной печи в емкость с водой не должна превышать 30 с;

– старения: нагрев до (160 ± 5) ºС, выдержка не менее 6 ч; охлаждение на воздухе; в результате старения должны быть получена твердость сплава в пределах 110–117 ед. по Бринеллю.

Такие жесткие требования к режиму термообработки связаны с необходимостью быстрого фиксирования происходящих при нагреве изменений фазового состава сплава, которые создают упрочняющий эффект.

Результаты испытания механических свойств образцов, изготовленных из проб-свидетелей, показали, что в результате модифицирования сплава НП нитрида титана TiN также установлено повышение механических свойств отливок (табл. 2).

Наномодифицирование сплава АК7 при литье детали типа «удлинитель картера». НП были опробованы на моторостроительном заводе при литье в кокиль детали типа «удлинитель картера» коробки передач автомобиля. С целью повышения уровня механических свойств этой детали была разработана композиция [22] на основе сплава АК9ч с добавкой до 2,3–2,5 % меди. Механические свойства образцов, вырезанных из деталей, отлитых из рафинированного и модифицированного тройным модификатором сплава, составили: $\sigma_в$ = 205 МПа, δ = 1,5 %, НВ = = 73,7 МПа, при модифицировании НП карбида кремния SiC после рафинирования они возросли соответственно до 245 МПа (на 16,3 %), до 4,0 % (в 2,7 раза) и до 79,7 МПа (на 7,5 %), НП B_4C – соответственно до 225 МПа (на 8,9 %), до 1,7 % (в 1,1 раза) и до 80,3 МПа (на 8,2 %) и НП карбонитрида ванадия VCN – соответственно до 235 МПа (на 12,8 %), до 2,0 % (в 1,3 раза) и до 84,1 МПа (на 12,4 %).

Оптимизация дозирования НП. С применением метода математического планирования эксперимента была проведена работа по установлению оптимального количества НП (на примере НП карбонитрида титана TiCN), необходимого для получения максимальных механических свойств отливок из сплава АЛ9 при литье в сырую песчаную форму, что само по себе отрицательно влияет на механические свойцства. Отлитые детали термообрабатывали по режиму Т4. В результате крутого восхождения по поверхности отклика максимальные механические свойства $\sigma_в$ = = 226 МПа и δ = 5,9 % были получены при расходе всего 0,004 мас. % НП TiCN, что превышает эти характеристики ($\sigma_в$ = 182,5 МПа и δ = 5,2 %) для сплава, модифицированного стандартным универсальным флюсом (50 % NaCl, 30 % NaF, 10 % Na_3AlF_6) соответственно на 23,8 % и на 13 %.

Таблица 2

Влияние модифицирования сплава нанопорошком нитрида титана TiN на механические свойства детали типа «обтекатель»

Технология приготовления сплава	Механические свойства			
	Временное сопротивление разрушению $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Твердость НВ единиц
	Величина/ прирост, %	Величина/ прирост, %	Величина/ прирост, %	Величина/ прирост, %
Стандартная	≥ 350	≥ 240	≥ 5,0	113,5
Модифицирование НП TiN	360/2,86	255,5/6,5	6,0/20,0	116,0/2,2

Применение НП для модифицирования выявило большое их преимущество перед обычными видами модифицирования: если при общепринятом их способе, которое производится введением в сплав лигатур, требуется вводить до 0,15–0,20 мас. % инокулирующего компонента (Ti, Zr, B и др.), то для получения аналогичного и даже более высокого эффекта измельчения структуры литого изделия требуется не более 0,05 мас. % НП. С применением метода математического планирования эксперимента была проведена работа по установлению оптимального количества НП (на примере TiCN), необходимого для получения максимальных механических свойств отливок из сплава АК7ч при литье в сырую песчаную форму. Отлитые детали термообрабатывали по режиму Т4. В результате крутого восхождения по поверхности отклика максимальные механические свойства $\sigma_в$ = = 226 МПа и δ = 5,9 % были получены при расходе 0,004 мас. % НП TiCN, что превышает эти характеристики ($\sigma_в$ = 182,5 МПа и δ = 5,2 %) для сплава, модифицированного стандартным тройным модификатором (состав приведен выше): $\sigma_в$ на 23,8 % и δ на 13,4 % (при 0,003 % TiCN $\sigma_в$ = 221 МПа, δ = 5,5 %; при 0,005 % TiCN – соответственно 211 МПа и 5,4 %).

В процессе проведения работы, выполненной в производственных условиях на реальных литых изделиях, было установлено, что независимо от химического состава НП (было опробовано более 20-ти видов), их кристаллической системы и класса, элементов симметрии, пространственной группы, структурного типа, периода решетки, плотности, температуры плавления и других характеристик, все они обладали близким модифицирующим эффектом.

Жидкая штамповка. Положительное воздействие НП было установлено также и при изготовлении ответственных деталей транспортного средства из сплава АК7ч массой 2,5 кг методом жидкой штамповки при удельном давлении $491 \cdot 10^6$ МПа. Результаты испытаний механических свойств показали, что по сравнению со стандартной технологией подготовки расплава и данными для сплава, модифицированного НП B_4C, $\sigma_в$ возросло на 6,3 % (с 245 до 261,5 МПа), а δ – в 2,1 раза (с 4,9 до 10,1 %), твердость осталась на прежнем уровне – 62,0 единиц НВ. По ГОСТ требуется $\sigma_в \geq 210$ МПа; $\delta \geq 2{,}0$ %; НВ $\geq 60{,}0$.

Сварка. Имея в виду тот факт, что процесс формирования кристаллической структуры литых изделий и сварного шва управляется одним и тем же механизмом, было опробовано применение модифицирующего прутка в качество сварочного электрода [23].

Следует при этом отметить, что работа была поставлена в связи с тем, что при изготовлении объемных сварных конструкций изделия ответственного назначения из листов алюминиевого деформируемого сплава АМг6 с использованием присадочной проволоки, изготовленной из этого же сплава, не всегда обеспечивалась требуемая прочность сварного соединения. Причиной этого оказался тот факт, что металл сварного шва отличался от металла листа более крупным зерном α-твердого раствора и более крупными выделениями β-фазы (Al_3Mg_2) по их границам.

При сварке объемной конструкции из листа сплава АМг6 применяли пруток-электрод диаметром 9,5 мм, содержащий порядка 2,0 % НП BN или LaB_6, или TiCN, изготовленный по той же технологии, что и модифицирующий пруток.

Сварку производили с помощью автоматической установки в среде аргона по слою флюса АН-АЧ. Качество шва по требованиям приемочной документации оценивали по величине $\sigma_в$ при испытании вырезанных из сваренной конструкции плоских образцов с размерами 15×50 мм.

Результаты испытаний показали, что $\sigma_в$ металла в области сварочного шва при сварке прутком, содержащим BN, составляло 333 МПа, LaB_6 – 338 МПа и 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.

Разработанный способ упрочнения сварочного шва можно считать не менее эффективным, чем исследованный в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН [24], при реализации которого проводили сварку разнородных металлов (Al–Ti, Ti–сталь) с помощью непрерывного CO_2-лазерного излучения с применением наноразмерных модифицирующих инокуляторов (размер частиц – до 20 мкм) виде порошков TiN и Y_2O_3, частицы которых плакировали хромом. Предварительно приготовленная суспензия, содержащая эти порошки, наносилась на поверхность свариваемых пластин толщиной 1–2 мм.

В результате, 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: $\sigma_в$ – в 1,23–1,35 раза, $\sigma_{0,2}$ – в 1,8–2,0 раза и δ – в 2,0–4,9 раза.

Основным недостатком этого способа, в отличие от сварки электродом, является необходимость применения наносодержащей суспензии. Во-первых, для закрепления суспензии на свариваемых участках необходимо производить ее подсушку, во-вторых, не представляется возможным ее закрепление на поверхностях, лежащих в трех измерениях. Эти недостатки отсутствуют при сварке электродами, содержащими НП в своем объеме.

Заключение. Таким образом, приведенные в работе результаты применения нанопорошковых технологий при производстве деталей с использованием металлургических технологий, показали их высокую эффективность в качестве измельчающих структуру изделий агентов, что обеспечивает повышение уровня механических свойств литых и сварных изделий из алюминиевых сплавов.

Библиографические ссылки

1. 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.

2. Petch N. J. Cleavage Strength of Polycrystals // J. Iron Steel Inst. 1953. Vol. 174. P. 25–28.

3. Специальные способы литья / В. А. Ефимов [и др.] М. : Машиностроение, 1991. 436 с.

4. ГОСТ 1583–93. Сплавы алюминиевые литейные.

5. Корольков А. М. Литейные свойства металлов и сплавов. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1960. 196 с.

6. Скуратов Д. Л., Трусов В. Н. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Самара : Изд-во СГАУ, 2012. 196 с.

7. Модифицирование силуминов. Киев : АН УССР, 1970. 179 с.

8. Бондарев Б. И., Напалков В. И., Тарарышкин В. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М. : Металлургия, 1979. 224 с.

9. Лепинских Б. М., Телицын И. И. Физико-химические закономерности модифицирования железоуглеродистых расплавов. М. : Наука, 1986. 96 с.

10. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 344 с.

11. Крушенко Г. Г. Нанопорошки химических соединений – средство повышения качества металлоизделий и конструкционной прочности // Заводская лаборатория. 1999. Т. 65, № 11. С. 42–50.

12. Крушенко Г. Г. Применение нанопорошков химических соединений для улучшения качества металлоизделий // Технология машиностроения. 2002. № 3. С. 3–6.

13. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. М. : Атомиздат, 1977. 264 с.

14. Гусев А. И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и их соединениях // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 1. С. 55–83.

15. Сумм Б. Д. Основы коллоидной химии. М. : Академия, 2007. 240 с.

16. Зубов В. И. Об особенностях термодинамики ультрадисперсных систем // Физикохимия ультрадисперсных систем : материалы IV Всерос. конф. М. : МИФИ, 1998. С. 23–26.

17. Feynman R. P. There's plenty of room at the bottom // Engineering and Science. 1960. Vol. 23, № 2. P. 22–36.

18. Taniguchi N. On the Basic Concept of «NanoTechnology» // Proceeding Intern. Conf. of Precision Engineering. Tokyo, 1974. Part II. P. 18–23.

19. Ультрадисперсные порошки металлов / И. Арсентьева [и др.] // Национальная металлургия. 2002. № 4. С. 66–71.

20. А. с. 831840 СССР, А1 МПК^5 С 22 С 1/06. Способ модифицирования литейных алюминиевых сплавов эвтектического типа / Г. Г. Крушенко, Ю. М. Мусохранов, И. С. Ямских и др. Заявка № 2831160 от 17.10.1979 // Открытия. Изобретения. 1981. № 19.

21. А. с. 839680 СССР, А1 МПК^5 В 22 D 27/00. Способ модифицирования сплавов / Г. Г. Крушенко, М. Ф. Жуков, А. А. Корнилов и др. Заявка. № 2811874 от 03.09.1979 // Открытия. Изобретения. 1981. № 23.

22. Использование в шихте вторичного сплава АК7 при производстве автомобильных отливок из сплава АЛ4 / Крушенко Г. Г. [и др.] // Литейное производство. 1979. № 1. С. 30.

23. Пат. 2429958 Российская Федерация, С2 МПК В 23 К 35/40. Способ изготовления электродной проволоки для сварки алюминиевых сплавов / Крушенко Г. Г. Заявка № 2009131289/02 от 17.08.2009 // Открытия. Изобретения, № 27. 2011.

24. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик / Сибирское отделение Российской академии наук. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. С. 138–139.

References

1. 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.

2. Petch N. J. Cleavage Strength of Polycrystals. *J. Iron Steel Inst.*,1953, vol. 174, p. 25–28.

3. Efimov V. A., Anisovich G. A., Babich V. N. et al. *Spetsial'nye sposoby lit'ja* [Special methods of casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, 436 p.

4. *GOST 1583–93. Splavy alyuminievye liteynye* [State Standard 1583-93. Aluminium casting alloys]. Moscow, Standartinform Publ., 1993.

5. Korol'kov A. M. *Liteynye svoystva metallov i splavov.* [Casting properties of metals and alloys]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR Publ., 1960, 196 p.

6. Skuratov D. L., Trusov V. N. *Obrabotka konstruktsionnykh materialov. Protsessy rezaniya i rezhushchie instrumenty.* [Treatment of structural materials. The processes of cutting and cutting tools]. Samara, Izdatel'stvo SGAU Publ., 2012, 196 p.

7. *Modifitsirovanie siluminov.* [Modification of silumins]. Kiev, AN USSR Publ., 179 p.

8. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararyshkin V. I. *Modifitsirovanie alyuminievykh deformiruemykh splavov.* [Modification of wrought aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 224 p.

9. Lepinskih B. M., Telicyn I. I. *Fiziko-khimicheskie zakonomernosti modifitsirovaniya zhelezo-uglerodistykh rasplavov.* [Physico-chemical principles of modification of iron-carbon melts]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 96 p.

10. 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 ultradispersed powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, 344 p.

11. Krushenko G. G. [Nanopowders of chemical compounds is a means of improving the quality of metal and structural strength]. *Zavodskaya laboratoriya.* 1999, vol. 65, no. 11, p. 42–50 (In Russ.).

12. Krushenko G. G. [The use of nanopowders chemical compounds to improve the quality of metal

products]. *Tekhnologiya mashinostroeniya.* 2002, no. 3, p. 3–6 (In Russ.).

13. Morohov I. D., Trusov L. I., Chizhik S. P. *Ul'tradispersnye metallicheskie sredy* [Ultrafine metal environment]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 264 p.

14. Gusev A. I. [Effects of nanocrystalline state in a compact metals and their compounds]. *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 1998, vol. 168, no. 1, p. 55–83 (In Russ.).

15. Summ B. D. *Osnovy kolloidnoy khimii.* [Foundations of colloid chemistry]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 240 p.

16. Zubov V. I. [About the features of the thermodynamics of ultradispersed systems. Physical chemistry of ultradispersed systems]. *Fizikokhimiya ul'tradispersnykh sistem: Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii.* [Materials of the IV all-Russian conference]. Moscow, MIFI Publ., 1998, p. 23–26 (In Russ.).

17. Feynman R. P. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*. 1960, vol. 23, no. 2, p. 22–36.

18. Taniguchi N. On the Basic Concept of "NanoTechnology". *Proceeding International Conference of Precision Engineering*. Tokyo, 1974, Part II, p. 18–23.

19. Arsent'eva I., Ushakov B., Zaharov N. et al. [Ultrafine powders of metals]. *Natsional'naya metallurgiya.* 2002, no. 4, p. 66–71 (In Russ.).

20. Krushenko G. G., Musokhranov Yu. M., Yamskikh I. S. et al. *Sposob modifitsirovaniya liteynykh alyuminievykh splavov evtekticheskogo tipa* [The method of inoculation of cast aluminum alloys of eutectic type]. Patent SU, no. 831840, 1981.

21. Krushenko G. G., Zhukov M. F., Kornilov A. A. et al. *Sposob modifitsirovaniya splavov.* [The method of inoculation of alloys]. Patent SU, no. 839680, 1981.

22. Krushenko G. G., Ostapenko A. A., Fershtman I. A. et al. [Use in the charge of the secondary alloy AK7 in the production of automotive castings of alloy AL4]. *Liteynoe proizvodstvo.* 1979, no. 1, p. 30 (In Russ.).

23. Krushenko G. G. *Sposob izgotovleniya elektrodnoy provoloki dlya svarki alyuminievykh splavov.* [A method of manufacturing an electrode wire for welding of aluminium alloys]. Patent RF, no. 2429958, 2011.

24. *Vozdeystvie vysokokontsentrirovannykh potokov energii na materialy s tsel'yu izmeneniya ikh fiziko-khimicheskikh svoystv i uluchsheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik. Sibirskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk v 2007 godu.* [The impact of highly concentrated streams of energy to materials to change their physical-chemical properties and improved performance. Siberian branch of the Russian Academy of Sciences in 2007.]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SB RAS Publ., 2008, p. 138–139.

© Крушенко Г. Г., Назаров В. П., Резанова М. В., 2015

УДК 661.693

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 241–245

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГЕРМАНИЯ В ЛИГНИТАХ НИЖНЕГО ПРИАНГАРЬЯ

А. Ф. Шиманский[1*], О. И. Подкопаев[2], С. А. Копыткова[2], Е. С. Балакчина[2], Е. Д. Кравцова[3]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]ОАО «Германий»
Российская Федерация, 660027, г. Красноярск, Транспортный проезд, 1/107
[3]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[*]E-mail: shimanaf@mail.ru

Производство полупроводникового германия в России вносит вклад в развитие аэрокосмической электроники. Германий используется в качестве подложек для эпитаксиальных структур $A^{III}B^{V}$ типа GaInP/GaInAs/Ge, являющихся основой солнечных элементов космического базирования с высоким КПД, достигающим 39 %. Стратегическим вопросом для германиевого производства является источник собственного сырья. В настоящее время в качестве перспективного германийсодержащего сырья рассматриваются лигниты, залегающие в Нижнем Приангарье в бассейне среднего течения р. Енисей.

Разработана методика выполнения измерений (МВИ) концентрации германия в лигнитах, включающая следующие операции: озоление лигнита, разложение зольной пробы в смеси концентрированных азотной и фтористоводородной кислот (1:2) и определение концентрации германия в растворе методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с использованием спектрометра iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific). Предложенная МВИ позволяет проводить количественный и качественный элементный анализ лигнитов и другого минерального сырья – углей, антрацитов, углистых аргиллитов и алевролитов.

Определены метрологические характеристики МВИ содержания германия в сырье. Показатели прецизионности при уровне измеряемой величины от 150 до 300 г/т составляют: стандартное отклонение повторяемости – 3,0 г/т; стандартное отклонение промежуточной прецизионности – 5,4 г/т. Относительная погрешность определения содержания германия не превышает 4 %.

Установлено, что среднее содержание германия в лигните составляет 0,02 мас. %, или 200 г/т. В составе лигнита доминируют углерод (68) и кислород (27 мас. %). Из числа металлических элементов преобладают кремний (1,0), алюминий (0,5) и железо (0,4 мас. %).

Ключевые слова: германий, сырье, лигнит, элементный состав, атомно-эмиссионная спектрометрия, методика выполнения измерений.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 241–245

THE GERMANIUM CONCENTRATION DETERMINATION IN LIGNITE OF LOWER ANGARA REGION

A. F. Shimanskiy[1*], O. I. Podkopaev[2], S. A. Kopytkova[2], E. S. Balakchina[2], E. D. Kravtsova[3]

[1]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
[2]JSC “Germanium”
1/107, Transportnuy Str., Krasnoyarsk, 660027, Russian Federation
[3]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[*]E-mail: shimanaf@mail.ru

Semiconductor Germanium production in Russia contributes to development of the aerospace electronics. Germanium used for solar cells, as it provides higher conversion efficiency than Silicon. In particular, it is determined that Ge can be used as a substrate material for $A^{III}B^{V}$ based solar cells type GaInP/GaInAs/Ge, and one of the leading results of conversion efficiency is about 39 %. The source of its own raw materials is the strategic issue for Germanium production. Currently, the lignites occurring in Lower Angara in basin of Yenisei River middle course are considered as the promising Germanium raw materials.

The measurement procedure of Germanium concentration in the lignite has been developed, which includes the following steps: ashing of the lignite, ash samples decomposition in a mixture of the concentrated nitric and hydrofluoric acid (1:2) and determination of the Germanium concentration in the solution by Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) using spectrometer iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific). The proposed measurement procedure allows carrying out qualitative and quantitative elemental analysis of lignite and other minerals - coal, anthracite, carbonaceous mudstone and siltstone.

Metrological characteristics of the measurement procedure have been identified. Indicators of precision when the Germanium concentration value of 150 to 300 g/t are: the standard deviation of repeatability – 3.0 g/t; the standard deviation of precision – 5.4 g/t. The relative error is less than 4 %.

It was found that the average germanium content in the lignite is 0.02 wt. % or 200 g/t. Carbon (68 wt. %) and oxygen (27 wt. %) are dominated in the composition of lignite. Silicon (1.0), aluminum (0.5) and iron (0.4 wt. %) predominate among the metallic elements.

Keywords: germanium, raw materials, lignite, elemental composition, atomic emission spectroscopy, measurement procedure.

Введение. Монокристаллы германия применяются в полупроводниковых нанотехнологиях в качестве подложек для эпитаксиальных структур, необходимых для изготовления солнечных элементов на основе систем GaInP/GaInAs/Ge, являющихся эффективными фотопреобразователями (ФЭП) космического базирования [1–4]. Широкое внедрение ФЭП на основе германия сдерживается в настоящее время высокой его стоимостью, которая, в свою очередь, в значительной мере определяется стоимостью и дефицитностью сырья.

В природе рудные месторождения германия являются редкостью, поэтому его производство за рубежом, как правило, связано с добычей и переработкой свинцово-цинковых либо полиметаллических сульфидных руд, которые содержат германий в количестве до 600 г/т [5]. В России и Китае основным источником германия являются угли [6]. Промышленные запасы германиеносного сырья сосредоточены в бурых углях и углистых породах (аргиллитах, алевролитах) на Сахалине, в Приморском крае и Читинской области. Содержание германия в углях составляет 150–350 г/т [7].

В настоящее время как перспективный источник германиевого сырья рассматриваются лигниты Красноярского края, залегающие в Нижнем Приангарье в бассейне среднего течения р. Енисей. Прогнозные ресурсы германия оцениваются в 19000 т [8; 9].

Сибирские лигниты – новый вид германиеносного сырья, малоизученный. В связи с этим настоящая работа направлена на разработку методики определения содержания германия в лигните, а также исследование его элементного состава.

Экспериментальная часть. Известный метод анализа углей, антрацитов, углистых аргиллитов и алевролитов включает озоление 1–2 г исследуемого материала при температуре 550–575 ºС в течение 4 ч и последующее разложение пробы при нагревании в смеси трех кислот (азотной, фтористоводородной и ортофосфорной) [10]. После отделения мешающих элементов путем экстракции четыреххлористым углеродом содержание германия определяется колориметрическим методом с использованием фенилфлуорона, вступающего в реакцию с германием с образованием комплексного соединения красного цвета.

Помимо большой продолжительности анализа, составляющей почти 20 ч, данный метод требует применения токсичного четыреххлористого углерода и последующей его утилизации. Альтернативные технологические приемы спектрофотометрического определения [11] или извлечения германия из золы от сжигания углей микробиологическими методами [12] требуют еще более длительного процесса пробоподготовки.

Предложенная нами методика выполнения измерений (МВИ) содержания германия в лигните включает следующие операции: озоление сырья, разложение зольной пробы в смеси концентрированных азотной и фтористоводородной кислот (1:2) и определение концентрации германия в растворе методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с использованием спектрометра iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific). Содержание германия в исходном сырье C_{Ge} (г/т) с учетом его аналитической влаги W (%) и зольности A (%) рассчитывается по формуле:

$$C_{Ge} = \frac{x \cdot V \cdot A}{m \cdot (100 - W)},$$

где x – аналитический сигнал при длине волны 265 нм, г/см^3; V – объем анализируемого раствора, см^3; m – масса навески воздушно-сухой пробы, г.

Озоление материала, также как в стандартной методике [10], проводили при температуре 550–575 ºС в течение 4 ч. Разложение зольных проб в смеси HNO_3 и HF производили с использованием системы пробоподготовки Hot Block (Environmental Express). Время, необходимое для разложения пробы при температуре 100–120 ºС, составляло 2–4 ч. Для защиты кварцевых деталей прибора, таких как распылительная камера, горелка и т. п., от воздействия непрореагировавшей фтористоводородной кислоты, добавляли 3–5 см^3 10%-ого раствора борной кислоты. Объем охлажденного раствора доводили до 50 см^3, предварительно добавив кадмий в качестве внутреннего стандарта из расчета содержания его в растворе – $2 \cdot 10^{-5}$ г/см^3.

Разработанная методика определения содержания германия, по сравнению со стандартной [9], позволяет сократить время пробоподготовки до 10 ч, уменьшить

расход реагентов, исключить использование вредного химического вещества – четыреххлористого углерода и операцию его последующей утилизации. Использование предложенной методики пробоподготовки в сочетании с методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой позволяет не только определять концентрацию германия, но также проводить количественный элементный анализ лигнита и другого минерального германийсодержащего сырья.

Для оценки метрологических характеристик аналитических измерений были отобраны 7 образцов различных сырьевых материалов с содержанием германия от 50 до 300 г/т. В течение десяти дней для каждого образца выполняли по два параллельных определения германия одним и тем же оператором без промежуточной калибровки аппаратуры. Результатом отдельного определения являлись измеряемые величины – показания прибора (концентрация (г/см^3)) и расчетные величины (содержание германия в исходном сырье (г/т)). Результаты ежедневного определения содержания германия в каждом из семи образцов составляли одну группу.

Для оценки промежуточной прецизионности как составляющей случайной погрешности, характеризующей результаты, полученные в одной лаборатории в разных условиях (ГОСТ Р ИСО 5725–2002), рассчитывали дисперсию S_R^2 (или соответствующее стандартное отклонение S_R) для десяти групп измерений [13].

Результаты анализа для одной из десяти групп представлены в табл. 1, в которой содержатся также сведения об аналитической влаге и зольности германийсодержащего сырья, массе навески, величине сигнала прибора, а также расчетное значение содержания германия.

Результаты расчета стандартных отклонений повторяемости и промежуточной прецизионности приведены в табл. 2.

Данные представленные в табл. 2, охватывают диапазон содержания германия в образцах до 300 г/т и демонстрируют тенденцию немонотонного возрастания случайной погрешности измерения с ростом его содержания. В связи с этим для принятия опорных значений стандартных отклонений повторяемости и промежуточной прецизионности, целесообразно разбить данный диапазон на два участка: с содержанием германия менее 150 г/т и 150 – 300 г/т. Графические зависимости стандартного отклонения повторяемости и промежуточной прецизионности для двух диапазонов содержания германия в сырье при этом имеют вид, представленный на рисунке.

Таблица 1

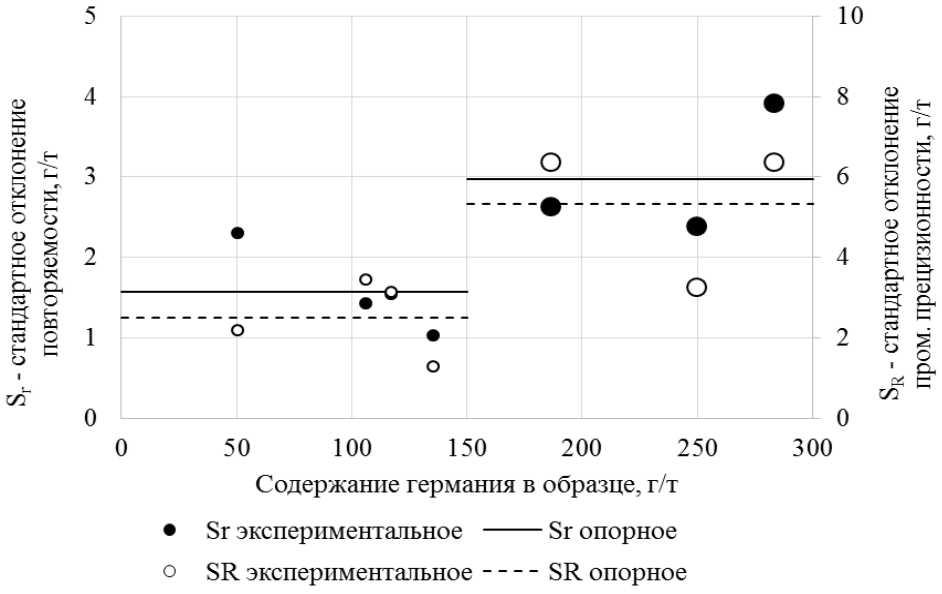
Результаты определения содержания германия в семи образцах для одной из групп

Номер образца	Тип образца	Аналитическая влага, %	Зольность, %	Навеска, г	Аналитический сигнал·10^6, г/см^3	Содержание германия, г/т
1	Лигнит	4,08	41,84	0,1014	0,246	53
				0,1006	0,242	52
2	Аргиллит	0,50	82,25	0,2577	0,718	115
				0,2562	0,704	113
3	Лигнит	2,96	27,98	0,1014	0,879	125
				0,1000	0,833	120
4	Лигнит	0,80	14,93	0,1005	1,831	137
				0,1000	1,807	136
5	Уголь	4,80	26,93	0,1004	1,375	194
				0,1015	1,370	191
6	Лигнит	0,80	4,08	0,1000	12,40	255
				0,1000	12,18	250
7	Аргиллит	0,09	79,65	0,2515	1,779	282
				0,2559	1,891	294

Таблица 2

Показатели качества МВИ

Показатель	Значения показателей						
Содержание германия, г/т	50,9	106,4	117,2	135,7	186,3	249,4	283,0
S_r, г/т – абсолютное стандартное отклонение повторяемости (по уровням и среднее)	1,6	1,4	1,5	1,0	2,6	2,4	3,9
	1,37				2,97		
S_r, % – относительное стандартное отклонение повторяемости (по уровням и среднее)	3,2	1,3	1,3	0,8	1,4	1,0	1,4
	1,65				1,27		
$S_R(t)$, г/т – абсолютное стандартное отклонение промежуточной прецизионности (по уровням и среднее)	1,9	3,4	3,1	1,3	6,4	3,3	6,4
	2,43				5,37		
$S_R(t)$, % – относительное стандартное отклонение промежуточной прецизионности (по уровням и среднее)	3,6	3,2	2,7	0,9	3,4	1,3	2,2
	2,60				2,30		



Зависимости стандартного отклонения повторяемости и промежуточной прецизионности для двух диапазонов содержания германия в сырье

Для практического применения данного метода измерений значения прецизионности при значении измеряемой величины от 50 до 150 г/т составляют:

– стандартное отклонение повторяемости – 1,4 г/т;

– стандартное отклонение промежуточной прецизионности – 2,4 г/т.

При этом относительная погрешность определения содержания германия не превышает 4 %.

При содержании германия в сырье от 150 до 300 г/т стандартное отклонение повторяемости результатов измерений составляет 3,0 г/т и стандартное отклонение промежуточной прецизионности – 5,4 г/т, а относительная погрешность определения содержания германия не превышает 2 %.

Проведен количественный элементный анализ лигнитов. Установлено, что в их составе доминируют углерод (68) и кислород (27 мас. %). Из числа металлических элементов преобладают кремний (1,0), алюминий (0,5) и железо (0,4 мас. %). Среднее содержание германия в лигните составляет 0,02 мас. %, или 200 г/т.

В табл. 3 приведены усредненные результаты определения элементного состава лигнита.

Таблица 3

Элементный состав лигнита

Элемент	Содержание в лигните, мас. %	Элемент	Содержание в лигните, мас. %
C	68	**Ge**	**0,02**
O	27	Na	0,002
Si	1,0	Cr	0,02
Al	0,5	Mg	0,03
Fe	0,6	V	0,01
Ca	0,1	Co	0,007
K	0,1	Ni	0,01
Ti	0,1	Sc	0,001

Следует отметить наличие в лигнитах одного из самых редких и дорогостоящих металлов – скандия [14]. С учетом зольности лигнита, составляющей ≈5 %, содержание Sc в золе может превышать 150 г/т, что превышает минимальное содержание, позволяющее положительно оценивать энергетическое топливо как сырье для его получения [15].

Заключение. На основании результатов исследований, проведенных с использованием разработанной методики выполнения измерений, можно заключить, что германийсодержащие лигниты Красноярского края, залегающие в бассейне среднего течения р. Енисей, являются перспективным сырьем для получения германия и скандия.

Библиографические ссылки

1. Claeys C., Simoen E. Germanium-based technologies: from materials to devices. Berlin : Elsevier, 2007. 449 p.

2. Claeys C., Simoen E. Extended Defects in Germanium: Fundamental and Technological Aspects. Berlin : Springer, 2009. 297 p.

3. Seebauer E. G., Kratzer M. C. Charged Semiconductor Defects: Structure, Thermodynamics and Diffusion. Berlin : Springer, 2008. 294 p.

4. Depuydt B., Theuwis A., Romandic J. Germanium: From the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers // Materials Science in Semiconductor Processing. 2006. Vol. 9, iss. 4. P. 437–443.

5. Frenzel M., Ketris M., Gutzmer J. On the geological availability of germanium // Mineralium Deposita. 2014. Vol. 49, iss. 4. P. 471–486.

6. Формы нахождения германия в бурых углях германиеносного месторождения Приморья / А. С. Якушевич [и др.] // Геохимия. 2013. № 5. С. 453–461.

7. Гамов М. И., Грановская Н. В., Левченко С. В. Металлы в углях. Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2012. 45 с.

8. Озерский Ю. А. Еханин А. Г. Перспективы изучения и освоения ресурсов германия в нижнемеловых лигнитах Касской площади // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314, № 1. С. 41–43.

9. Лигниты среднего течения р. Енисей и перспективы их использования для производства германия / В. А. Макаров [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2014. Т. 7, № 7. С. 862–871.

10. ГОСТ 10175–75. Угли бурые, каменные, антрациты, углистые аргиллиты и алевролиты. Метод определения содержания германия. М. : Изд-во стандартов, 1975. 8 с.

11. Чмиленко Т. С., Иваница Л. А., Чмиленко Ф. А. Спектрофотометрическое определение германия в коксе, углях и растительном материале // Заводская лаборатория: диагностика материалов. 2014. Т. 80, № 11. С. 11–14.

12. Поведение германия и галлия при переработке золы от сжигания углей химическими и микробиологическими методами / И. А. Блайда [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2014. Т. 57, № 1. С. 78–83.

13. ГОСТ Р ИСО 5725–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. М. : Изд-во стандартов, 2002. 64 с.

14. Золы природных углей – нетрадиционный сырьевой источник редких элементов / Г. Л. Пашков [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2012. Т. 5, № 5. С. 520–530.

15. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России : справочник / Ю. Н. Жаров [и др.]. М. : Недра, 1996. 239 с.

References

1. Claeys C., Simoen E. Germanium-based technologies: from materials to devices. Berlin [etc.]: Elsevier, 2007, 449 p.

2. Claeys C., Simoen E. Extended Defects in Germanium: Fundamental and Technological Aspects. Berlin [etc.]: Springer, 2009, 297 p.

3. Seebauer E. G., Kratzer M. C. Charged Semiconductor Defects: Structure, Thermodynamics and Diffusion. Berlin [etc.]: Springer, 2008, 294 p.

4. Depuydt B., Theuwis A., Romandic J. Germanium: From the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers. Materials Science in Semiconductor Processing. 2006, vol. 9, iss. 4, p. 437–443.

5. Frenzel M., Ketris M., Gutzmer J. On the geological availability of germanium. *Mineralium Deposita*. 2014, vol. 49, iss. 4, p. 471–486.

6. Yakushevich A. S., Bratskaya S. Yu., Ivanov V. V., Polyakova N. V., Avramenko V. A. Germanium Speciation in Lignite from a Germanium - Bearing Deposit in Primorye. *Geochemistry International*, 2013, vol. 51, no 5, p. 405–412.

7. Gamov M. I., Granovskaya N. V., Levchenko S. V. *Metally v uglyakh.* [Metals in coals]. Rostov-on-Don, Southern federal university Publ., 2012, 45 p. (In Russ).

8. Ozerskiy Yu. A. Ekhanin A. G. [Prospects of studying and development of resources Germany in the Kasskaya Square lignites]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009, vol. 314, no 1, p. 41–43 (In Russ).

9. Makarov V. A., Podkopaev O. I., Koz'min D. G., Naidko V. I., Shimanskiy A. F., Kopytkova S. A. [Lignite from Central Watershed of the Yenisei River and Prospects for their use for Manufacture of Germanium] *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii.* 2014, vol 7, no 7, p. 862–871 (In Russ).

10. *GOST 10175–75. Ugli burye, kamennye, antratsity, uglistye argillity i alevrolity. Metod opredeleniya soderzhaniya germaniya.* [State Standart R 10175–75. Brown coals, hard coals, anthracites, carbonaceous argillites and alevrolites. Method for the determination of germanium], Moscow, Standartinform Publ., 1975. 8 p. (In Russ).

11. Chmilenko T. S., Ivanitsa L. A., Chmilenko F. A. [Spectrophotometric Determination of Germanium in Coke, Coals and Plant Material]. *Zavodskaya laboratoriya: diagnostika materialov.* 2014, vol. 80. no. 11, p. 11–14 (In Russ).

12. Blayda I. A., Vasil'eva T. V., Slyusarenko L. I., Khitrich V. F [Behavior Germany and gallium when processing ashes from burning of coals by chemical and microbiological methods]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: khimiya i khimicheskaya tekhnologiya.* 2014, vol. 57, no 1, p. 78–83 (In Russ).

13. *GOST R ISO 5725–2002. Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy.* [State Standart R ISO 5725–2002. Accuracy (correctness and pretsizionnost) methods and results of measurements] Moscow, Standartinform Publ., 2002, 64 p. (In Russ).

14. Pashkov G. L., Saykova S. V., Kuz'min V. I., Panteleeva M. V., Kokorina A. N., Linok E. V. [Natural Coal Ash – Unconventional Source of Rare Elements]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii.* 2012, vol. 5, no 5, p. 520–530 (In Russ).

15. Zharov Yu. N., Meytov E. S., Sharova I. G. et al. *Tsennye i toksichnye elementy v tovarnykh uglyakh Rossii: spravochnik* [Valuable and toxic elements in commodity coals of Russia: reference book], Moscow, Nedra Publ., 1996, 239 p.

Шиманский А. Ф., Подкопаев О. И., Копыткова С. А., Балакчина Е. С., Кравцова Е. Д., 2015

Раздел
Part
4

ЭКОНОМИКА

ECONOMICS

УДК 338.45.01

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 248–252

ТИПОЛОГИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

В. Г. Бревнов*, Л. В. Ерыгина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федарация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: Vasiliy.brevnov@mail.ru

Оборонно-промышленный комплекс традиционно является локомотивом российской экономики, поскольку именно в нём сосредоточено более половины всех инновационных разработок, существующих в нашей стране. Применение результатов наукоёмких исследований возможно в целях защиты суверенитета и территориальной целостности Российской Федерации, продажи на международных рынках продукции военного и двойного назначения, реализации в различных отраслях народного хозяйства. Оборонная промышленность не может существовать без должного внимания, контроля и управления со стороны государства. Таким образом, необходимы инструменты устойчивого роста, с помощью реализации которых возможно передать импульс опережающего развития и одновременно осуществить контроль результатов. Вне всякого сомнения, данным инструментом являются инновационные проекты. Однако их реализация требует чёткой классификации с целью выбора наиболее эффективных. На начальном этапе исследования рассмотрены постреформенные показатели деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса, указаны объёмы финансирования государственного оборонного заказа. Представлены различные точки зрения относительно содержания понятия «инновационный проект». В границах настоящего исследования используется авторское толкование данного понятия применительно к рассматриваемой тематике. Выделены особенности предприятий и инновационных проектов оборонно-промышленного комплекса. Затронут вопрос о влиянии территории размещения предприятий оборонной промышленности на процессы их устойчивого функционирования. Изучен вопрос типологии инновационных проектов предприятий оборонно-промышленного комплекса. Перед авторами стояла задача разработать типологию, соответствующую особенностям предприятий оборонной промышленности. Исследованы существующие типологии инновационных проектов, представляющие наибольший научный интерес. Изучены признаки классификаций, выделены наиболее распространённые. В качестве результата предложена типология инновационных проектов на предприятиях оборонно-промышленного комплекса.

Ключевые слова: инновации, инновационный проект, оборонно-промышленный комплекс, типологии инновационных проектов.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 248–252

TYPOLOGY OF INNOVATIVE PROJECTS AT THE DEFENSE INDUSTRY ENTERPRISES

V. G. Brevnov*, L. V. Erygina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
*E-mail: Vasiliy.brevnov@mail.ru

The defense industry is traditionally the engine of the Russian economy. In this sphere it is concentrated more than a half of all innovative development existing in our country. Application of the results of researches is possible, in a case of protection of the sovereignty and territorial integrity of the Russian Federation, in national economy civil industries, and for the purpose of sale in the international military and civil production markets. The defensive industry can't exist indifferently, from state control and management. In this regard we need steady instruments growth by means of which realization it is possible to transfer advancing development impulse and at the same time to exercise control of results. No doubt, these tools are innovative projects. However their realization demands accurate classification, for the purpose of a choice the most effective. At the initial research stage post-reform activity indicators of the defense industry enterprises are considered, the financing amounts of the state defensive order are specified. Various points of view concerning the content innovative project are presented. In borders of the real research author's interpretation of this concept in relation to the considered subject is used. The features of the enterprises and innovative projects defense

industry complex are marked out. It is raised the influence question of the territory placement of the defensive industry enterprises on processes their steady functioning. The question about innovative projects typology of the defense industry enterprises complex is studied. The authors were faced by a task to develop typology corresponding to features of the defensive industry enterprises. The existing typology of innovative projects, representing the greatest scientific interest is investigated. Classifications sings are studied, the most widespread are allocated. As result, the innovative projects typology at the defense industry enterprises is offered.

Keywords: innovations, innovative project, defense industry, typology of innovative projects.

Введение. Развитие инновационных технологий в Российской Федерации происходит под влиянием различных политических и экономических преобразований. В настоящий момент отечественными предприятиями реализуется ряд сложных инновационных проектов в различных отраслях экономики. Происходит структурная модернизация оборонно-промышленного комплекса (ОПК), его предприятий, ориентированных на производство инновационной и конкурентоспособной продукции. На данный момент инновации имеют стратегическую важность и определяют эффективность, конкурентоспособность и качество развития экономики государства.

По результатам практически завершенной реформы ОПК, направленной на концентрацию финансовых, технологических, производственных и кадровых ресурсов, получен результат в виде пятидесяти пяти объединённых структур, вобравших научно-промышленный потенциал государства и обеспечивающих выпуск 67 % продукции, треть которой импортируется за рубеж. Остальная часть продукции оборонно-промышленного комплекса производится в интересах российских вооружённых сил и гражданской сферы экономики.

Существенных объёмов достигает государственный оборонный заказ, составивший в 2013 году более 1 трлн 300 млрд руб, что на 420 млрд больше, чем в 2012 году. Всего на развитие ОПК и обеспечение выполнения предприятиями государственной программы вооружений в течение 2012–2014 гг. направлено 354 млрд руб [1].

Особенности предприятий оборонно-промышленного комплекса. Современное состояние ОПК характеризуется следующими особенностями:

1) имеется в наличии два вида производств – военное и гражданское;

2) предприятия ОПК реализуют широкий спектр инноваций, отрасль производит значительные объёмы инновационной продукции;

3) преобладают наукоёмкие производства, поскольку научно-исследовательские программы связаны с космическими исследованиями;

4) предприятия ОПК представлены конструкторскими бюро, производственными предприятиями и научно-производственными объединениями; результатами их деятельности могут быть инновационные проекты – новшества либо инновации;

5) состав и количество этапов инновационного процесса на предприятиях ОПК варьируется в зависимости от типа предприятий и особенностей производства;

6) реализация инновационных проектов и производство изделий осуществляются в строго заданные сроки;

7) проекты обладают высокой степенью надёжности, высоким качеством и неразрывно связаны с безопасным жизнеобеспечением;

8) часть разработок могут быть использованы для производства гражданской продукции;

9) отсутствует либо существенно ограничен публичный доступ к содержанию некоторых инновационных проектов.

Вместе с тем на деятельность российского ОПК оказывают влияние особенности территориального размещения предприятий и производственных комплексов, свойственные как промышленно развитым, так и имеющим ресурсную ориентацию регионам:

– обширность территории и низкая плотность населения, препятствующие равномерному размещению производительных сил в экономическом пространстве;

– сосредоточенность ресурсного потенциала в малоосвоенных территориях;

– ограниченность численности экономически активного населения;

– очаговый тип развития промышленного комплекса;

– ограниченность инвестиционных и финансовых ресурсов [2].

Сущность инновационного проекта. В свою очередь движущей силой экономического развития, равно как и зеркалом процессов, происходящих на предприятиях такой важной отрасли, как оборонно-промышленный комплекс, являются инновационные проекты.

В границах настоящего исследования, с целью определения роли инновационных проектов на предприятиях ОПК, изучено множество толкований данного термина, предложенных как отечественными, так и зарубежными учёными. Имеет смысл остановиться на тех из них, которые отражают его содержание как категории.

Так, А. К. Казанцев и А. С. Серова считают, что инновационный проект представляет собой комплект документов, предназначенных для его реализации [3].

И. Ю. Евграфова под инновационным проектом понимает форму целевого управления инновационной деятельностью [4].

Исследователи Н. П. Грибалев и И. Г. Игнатьева, в свою очередь, представляют инновационный проект как комплекс научно-исследовательских, опытно-конструкторских, организационных, производственных, финансовых и других мероприятий, увязанных по ресурсам, срокам и исполнителям, оформленных комплектом проектной документации и приводящих к инновации [5].

Х. Р. Кауфман рассматривает инновационный проект как работу для достижения отдельной, ясно определённой цели [6].

В научной литературе имеются и нераспространённые точки зрения. Так, В. В. Быковский полагает, что инновационный проект – это процесс целенаправленного изменения или создания новой технической или социально-экономической системы [7]. В. Д. Дорофеев и В. А. Дресвянников выделяют инновационный проект как разновидность инвестиционного проекта, бизнес-проекта и представляющего собой систему, содержащую множество проектных решений в научной, технической, производственной, экономической (финансовой), управленческой, маркетинговой областях [8].

Однако большинство из предложенных определений в полной мере не отражает специфику предприятий ОПК. В этой связи в настоящем исследовании предлагается использовать собственное толкование рассматриваемого термина.

Инновационный проект на предприятии оборонно-промышленного комплекса – это комплекс соответствующим образом упорядоченных мероприятий полного инновационного цикла, сопряжённых с безопасным жизнеобеспечением, осуществляемых в строго определённые сроки, финансируемых государством, необходимых для достижения целей в передовых областях науки и производства конкурентоспособной продукции военного (двойного, гражданского) назначения, при этом публичный доступ к содержанию инновационного проекта отсутствует либо ограничен.

Типология инновационных проектов на предприятиях оборонно-промышленного комплекса. Различные инновационные проекты реализуют совершенно отличные друг от друга инновации и оцениваются с позиций специфики проекта, его важности, поэтому исследователи выделяют классификации, различные по природе и содержанию, поскольку требуют наличия определённого уровня инновационного потенциала у предприятий.

В настоящий момент в научной литературе отсутствует широко используемая типология инновационных проектов, что свидетельствует о том, что изучению данного вопроса уделяется недостаточно внимания. Большинство исследователей указывают на различные признаки в классификации инновационных проектов. Существующие признаки классификации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Признаки классификации инновационных проектов

Автор	Признаки
А. К. Казанцев, Л. С. Серова	Период реализации, характер целей, вид удовлетворяемой потребности, тип инновации и уровень принимаемых решений [9]
А. Г. Поршнева, З. П. Румянцева, Н. А. Салометина	Уровень научно-технической значимости проектов и масштабность решаемых задач [10]
А. А. Вишняков	Инновационный потенциал предполагаемой инновации, период реализации проекта, размер проекта, охват стадий инновационного процесса, источник финансирования проекта [11]
О. К. Грицевский	Вид инновационного изменения, фаза инновационных исследований, уровень вносимой новизны, область применения, время реализации, логическая форма использования, прогнозируемое время полезного использования, риск негативного исхода, объём привлекаемых ресурсов, связь с другими областями деятельности хозяйствующих субъектов [12]
В. А. Сергеев, Е. В. Кипчарская, Д. К. Подымало	Новизна и приоритетность, технико-технологическая осуществимость, сфера деятельности, отраслевая принадлежность, рыночная привлекательность, наличие необходимого капитала, возможные источники финансирования, характер возможных денежных затруднений, масштаб проекта, наличие персонала с необходимым уровнем квалификации, оценка темпов роста бизнеса, размер потенциальной клиентуры, предполагаемые конкуренты и преимущества перед ними, стратегия в бизнесе, степень риска инновационного бизнеса, необходимость получения сертификатов и лицензий, защищенность нового продукта патентами или авторскими свидетельствами, соответствие проекта имеющемуся законодательству, наличие административной поддержки инновационного проекта [13]
В. М. Аньшин, А. А. Дагаев	Уровень новизны, глубина изменения, объект приложения, характер удовлетворяемых потребностей, сфера приложения, причины возникновения, характер воздействия на рыночно-технологические возможности фирмы, масштабы распространения, масштабы новизны [14]
Т. Е. Балобан	Направление осуществления инновационной деятельности, цель осуществления инновационной деятельности, характер корреляционной зависимости показателей эффективности инновационных проектов, объект осуществления инновационной деятельности, результат осуществления инновационной деятельности [15]
М. А. Ягольницер, Л. С. Марков	Организационно-правовая форма предприятия, форма собственности, виды вовлеченных в реализацию проекта ресурсов, ресурсы которые требуется дополнительно вовлечь в реализацию проекта, предполагаемая форма использования вновь привлекаемых ресурсов, варианты предполагаемого участия новых партнеров в реализации проекта, предлагаемые формы компенсации использования ресурсов новых партнеров [16]

Окончание табл. 1

Автор	Признаки
Специалисты технологического парка Могилёв	Уровень научно-технической значимости, при этом уровень значимости проекта определяют сложность, длительность, состав исполнителей, масштаб, характер продвижения результатов инновационного процесса, предметно-содержательная структура, характер инновационной деятельности, характер целей, период реализации, тип инноваций, вид удовлетворяемых потребностей, масштабность решаемых задач [17]
Е. Ю. Евграфова	Уровень решения, характер целей проекта, вид потребности, тип инновации, период реализации, масштабность [18]

В большинстве своём представленные классификационные признаки являются типовыми и могут быть неприменимы для специализированных инновационных проектов, в частности, для реализуемых в ОПК. При этом общими признаками в большинстве классификаций являются:

1) период реализации проекта;
2) масштаб;
3) источник финансирования;
4) объект осуществления инновационной деятельности;
5) объёмы привлекаемых ресурсов;
6) тип инновации;
7) уровень научно-технической значимости;
8) уровень новизны;
9) степень риска проекта.

Учитывая вышеназванные особенности предприятий ОПК, предложена классификация инновационных проектов, представленная в табл 2.

Таблица 2

Типология инновационных проектов на предприятиях ОПК

Признак	Виды проектов
По направлению осуществления инновационной деятельности	Военные; конверсионные; гражданские
По объекту осуществления инновационной деятельности	Продуктовые; технологические; управленческие; концептуальные
По результату осуществления инновационной деятельности	Новшества; инновации
По составу этапов процесса разработки	Включающие все этапы исследований; включающие ограниченный состав этапов
По направленности воздействия на основные технологии, продукты и рынки	Расширяющие; замещающие
По количеству этапов	Многоэтапные; малоэтапные
По времени осуществления	Краткосрочные; среднесрочные; долгосрочные
По видам риска, оказывающим влияние на проект	Высокорисковые; низкорисковые; с оптимальным уровнем риска
По уровню секретности	Секретные; с ограниченным доступом; с публичным доступом
По уровню решения	Федеральные; региональные; отраслевые; межотраслевые

Заключение. Обобщая всё вышеизложенное, целесообразно сделать следующий вывод. Инновационный проект является одним из способов реализации инноваций, определяющим возможность экономической системы к развитию посредством реализации положений инновационного проекта и возможностей экономической системы.

На предприятиях ОПК реализуются продуктовые и технологические инновационные проекты, однако им практически не свойственны рыночные и маркетинговые.

Таким образом, предложенная типология инновационных проектов учитывает специфику деятельности предприятий ОПК. Рассматривая различные подходы к классификации инновационных проектов, необходимо учитывать, что систематизация классификационных признаков и формирование научно обоснованной классификации имеют особую важность. Каждая классификация обладает способностью дать детальное представление о характеристиках того или иного инновационного проекта, что, в свою очередь, необходимо для осуществления адекватной поддержки со стороны государства, реализации инновационных проектов на различных предприятиях Российской Федерации.

Библиографические ссылки

1. Состояние и проблемы модернизации военно-промышленного комплекса Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://council.gov.ru/activity/analytics/publications/577 (дата обращения: 20.12.2014).
2. Аврамчикова Н. Т., Чувашова М. Н. Проблемы повышения качества экономического пространства в ресурсно-ориентированных регионах Российской Федерации // Региональная экономика: Теория и практика. 2014. № 5(332). С 2–12.
3. Казанцев А. К., Серова Л. С. Основы производственного менеджмента : учеб. пособие. М. : Инфра-М. 2002. 542 с.
4. Красникова Е. О., Евграфова И. Ю. Инновационный менеджмент. М. : Окейкнига. 2009. 84 с.
5. Грибалев Н. П., Игнатьева И. Г. Бизнес-план: практическое руководство по составлению. СПб. : АО Белл, 1994. 158 с.
6. Кауфман Х. Р. Тактика успеха в бизнесе и науке: творчество, деньги, слава : пер. с англ. М. : Интеллект, 1993. 159 с.
7. Поршнева А. Г., Кибанова А. Я., Гунина В. Н. Управление организацией : энциклопедический словарь. М. : Инфра-М, 2001. 822 с.

8. Дорофеев В. Д., Дресвянников В. А., Инновационный менеджмент : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 189 с.

9. Завлин Б. Н., Казанцева А. К., Миндели Л. Э. Инновационный менеджмент : справ. пособие. М. : Наука, 1997. С. 505–506.

10. Поршнева А. Г., Румянцева З. П., Салометина Н. А. Управление организацией : учебник. М. : Инфра-М, 1999. С. 299–302.

11. Вишняков А. А. Совершенствование механизма оценки реализуемости инновационных проектов : дис. ... канд. экон. наук. Саратов, 1999. 131 с.

12. Грицевский О. К. Критерии эффективности инновационных проектов и программ в системе транспортной логистики : дис. ... канд экон. наук. Москва, 2010. 139 с.

13. Сергеев В. А., Кипчарская Е. В., Подымало Д. К. Основы инновационного проектирования : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 246 с.

14. Аньшин В. М., Дагаев А. А. Инновационный менеджмент: Концепции, многоуровневые стратегии и механизмы инновационного развития : учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Дело, 2007. 584 с.

15. Балобан Т. Е. Инструменты управления рисками инновационной деятельности на предприятиях ОПК : дис. ... канд экон. наук : Красноярск, 2012. 132 с.

16. Унтура Г. А., Ягольницер М. А., Марков Л. С. Типология инновационных проектов // ЭКО. 2005. № 10. С. 53–63.

17. Программа курса «Инновационный менеджмент» [Электронный ресурс]. URL: http://www.technopark.by/business/206.html (дата обращения: 01.12.2014).

18. Евграфова Е. Ю. Инновационный менеджмент. М. : Научная книга, 2012. 120 с.

References

1. *Sostoyanie i problemy modernizatsii voenno-promyshlennogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii* [State and Problems of Military Industrial Complex Modernization of the Russian Federation] (In Russ.). Available at: http://council.gov.ru/activity/analytics/publications/577 (accessed 20.12.2014).

2. Avramchikova N. T., Chuvachova M. N. [Problems of improvement of quality of economic space in the resource focused regions of the Russian Federation]. *Regional'naya ekonomika: Teoriya i praktika.* 2014, no. 5(332), P. 2–12 (In Russ.).

3. Kazantsev A. K., Serova L. S. *Osnovy proizvodstvennogo menedzhmenta: Uchebnoe posobie* [Fundamentals of Production Management: Textbook]. Moscow, Infra-M Publ., 2002, 542 p.

4. Krasnikova E. O., Evgrafova I. Y. *Innovatsionnyi menedzhment* [Innovative management]. Moscow, Okeykniga Publ., 2009, 84 p.

5. Gribalev N. P., Ignat'eva I. G. *Biznes-plan: prakticheskoe rukovodstvo po sostavleniyu*. [Business plan Practical guidance on drawing up]. Saint-Petersburg, AO Bell Publ., 1994, 160 p.

6. Kaufman Kh. R. *Taktika uspekha v biznese i nauke: tvorchestvo, den'gi, slava.* [Tactics of success in business and science: creativity, money, glory]. Moscow, Intellekt Publ., 1993, 159 p.

7. Porshneva A. G., Kibanova A. Ya., Gunina V. N. *Upravlenie organizatsiey: entsiklopedicheskiy slovar'.* [Management of the organization: The encyclopedic dictionary]. Moscow, Infra-M Publ., 2001, 822 p.

8. Dorofeev V. D., Dresvyannikov V. A. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovative management: Studies]. Penza, Penz gos unt Publ., 2003, 189 p.

9. Zavlin B. N., Kazantseva A. K., Mindeli L. E. *Innovatsionnyy menedzhment. Sprav. Posobie.* [Innovative management]. Moscow, Nauka Publ., 1997, p. 505–506.

10. Porshenva A. G., Rumyantseva Z. P., Salometina N. A. *Upravlenie organizatsiey* [Management of the organization]. Moscow, Infra-M Publ., 1999, p. 299–302.

11. Vishnyakov A. A. *Sovershenstvovanie mekhanizma otsenki realizuemosti innovatsionnykh proektov. Dis. kand. econ. nauk.* [Improvement of the mechanism of an assessment of feasibility of innovative projects. Kand. econ. sci. diss]. Saratov, SGSEU Publ., 1999, 131 p.

12. Gritsevskiy O. K. *Kriterii effektivnosti innovatsionnykh proektov i programm v sisteme transportnoy logistiki. Dis. kand. econ. nauk.* [Criteria of efficiency of innovative projects and programs in system of transport logistics. Kand. econ. sci. diss]. Moscow, GASIS Publ., 2010, 139 p.

13. Sergeev V. A., Kipcharskaya E. V., Podymalo D. K. *Osnovy innovatsionnogo proektirovaniya* [Bases of innovative design]. Ul'yanovsk, UGTU Publ., 2010. 246 p.

14. An'shin V. M., Dagaev A. A. *Innovatsionnyy menedzhment: Kontseptsii, mnogourovnevye strategii i mekhanizmy innovatsionnogo razvitiya* [Innovative management: Concepts, multilevel strategy and mechanisms of innovative development]. Moscow, Delo Publ., 2007, 584 p.

15. Baloban T. E. *Instrumenty upravleniya riskami innovatsionnoi deyatel'nosti na predpriyatiyakh OPK. Dis. kand. econ. nauk.* [Instruments of risk management of innovative activity on defense industry enterprises. Kand. econ. sci. diss]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2012, 132 p.

16. Untura G. A., Yagol'nitser M. A., Markov L. S. [Typology of innovative projects]. EKO. 2005, no. 10, p. 53–63 (In Russ.).

17. *Programma kursa Innovatsionnyi menedzhment* [Program of the course "Innovative Management"]. Available at: URL: http://www.technopark.by/business/206.html (accessed 15.12.2014).

18. Evgrafova E. Yu. *Innovatsionnyi menedzhment* [Innovative management]. Moscow, Nauchnaya kniga Publ., 2012, 120 p.

© Бревнов В. Г., Ерыгина Л. В., 2015

УДК 623

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 253–260

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Д. К. Латышенок

Красноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90
E-mail: Dukenukem2000@mail.ru

В статье говорится о том, что такое оборонно-промышленный комплекс России, в чем заключаются его функции, рассматривается его современное состояние, чем оно характеризуется. Предметом анализа является оборонно-промышленный комплекс России. Цель проведённого анализа – показать, в каком состоянии находится оборона России. Статья была написана с использованием материалов из других работ, журналов и официальных слов депутатов Государственной думы. Результат данной работы заключается в том, чтобы показать, в каком состоянии находится оборонно-промышленный комплекс России и что повлияло на его сегодняшнее состояние. После развала Советского Союза оборонно-промышленный комплекс находился в сильном упадке. После прихода к власти президент Владимир Владимирович Путин начал активную программу модернизации всей оборонной промышленности Российской Федерации.

Начиная с распада СССР, отсутствие госзаказов и низкая загруженность предприятий «вогнали» всю оборонную промышленность в кризис, в котором она находится до сих пор. Посещение оборонных предприятий в разных регионах РФ показывает, что ключевые проблемы у предприятий оборонно-промышленного комплекса общие. Программа развития до 2020 года, построенная на импортозамещении и вливании крупных сумм, призвана восстановить всю мощь предприятий оборонно-промышленного комплекса. Принимаемые в последнее время государством меры привели к увеличению доли выпуска военной продукции в общих объемах производства отрасли. Как отметил глава государства, особый акцент должен быть сделан на развитие технологической базы, обеспечивающей производство космических средств мирового уровня.

Рост инвестиций в отрасль в 2011 году составил 116 % по отношению к уровню предшествующего года. Средства направляются на приобретение нового оборудования, модернизацию испытательной инфраструктуры, создание новых производственных мощностей. Темпы роста производства в ОПК превышают темпы в других отраслях промышленности.

Ключевые слова: оборона, производство, современное состояние, развитие, промышленный комплекс.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 253–260

CURRENT STATE OF THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX OF RUSSIA

D. K. Latyshenok

Krasnoyarsk State Agrarian University
90, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
E-mail: Dukenukem2000@mail.ru

This article talks about what the military-industrial complex of Russia is, its functions, discusses its current status, how it is characterized. The subject of the article is the military-industrial complex of Russia. The purpose of writing this article is to show the condition of the Russian defense. The article was written using material from other papers, magazines and official word of deputies of the State Duma. The result of this work is to show the condition of the military-industrial complex of Russia and that influenced its current state. After the collapse of the Soviet Union military-industrial complex is in a big decline. After coming to government, President Vladimir Putin began an active program of modernization of the entire defense industry of the Russian Federation.

Since the collapse of the USSR, no contracts and low utilization enterprises drove the entire defense industry crisis in which the industry is still. The research of defense enterprises in different regions of the Russian Federation shows that the key problems in enterprises of the military-industrial complex are general. In Russia there is a serious technological gap of the Russian defense industry from leading industrial Nations. Moral and physical aging of technologies, equipment and products to stop so far failed. The Development Programme to 2020 built on import substitution and infusion of large sums is intended to restore the power of military-industrial complex. The recently taken measures by the state have resulted in the increase of the share of military production in the total production of the industry. Particular emphasis should be placed on the development of technological base, ensuring the production of space means the world level, said the head of state.

The growth of investment in the industry in 2011 was 116 percent compared to the level of the previous year. Funds are used to purchase new equipment, modernization of the test infrastructure, creation of new production facilities. Production growth in the defense industry exceeds the rate in other industries.

Keywords: defense, production, current status, development, industrial complex.

Введение. Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) – совокупность научно-исследовательских, испытательных организаций и производственных предприятий, выполняющих разработку, производство, хранение, постановку на вооружение военной и специальной техники, амуниции, боеприпасов и т. п. преимущественно для государственных силовых структур, а также на экспорт. Он включает органы государственного управления и власти, промышленные предприятия и научные организации, занимающиеся оборонными исследованиями и созданием вооружения и военной техники.

К утвержденным на государственном уровне приоритетным направлениям развития науки и технологий в Российской Федерации отнесены космические системы, а в число критических технологий РФ вошли технологии создания новых поколений ракетно-космической техники.

Определение оборонно-промышленного комплекса. В ОПК сосредоточена большая часть передовых технологий военного и гражданского назначения, сконцентрированы высококвалифицированные кадры отечественной научно-промышленной сферы.

Основное звено ОПК РФ – военная промышленность: авиаракетная и атомная, военное судостроение, производство военной радиоэлектроники, бронетанковой техники, боеприпасов, артиллерийско-стрелкового вооружения и т. д.

В гражданском секторе опережающими темпами развивается судостроение, производство авиационной техники, вычислительной техники и средств связи, технологического оборудования для топливно-энергетического комплекса, изделий медицинской техники.

Процесс создания продукции военного назначения в современных условиях определяется, с одной стороны, потребностями военной организации государства для решения поставленных перед ней задач, с другой – возможностями ОПК по удовлетворению этих потребностей.

ОПК насчитывает более полутора тысяч производственных предприятий, научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро, расположенных на территории 72 субъектов РФ, из них около 40 % – в Центральном федеральном округе.

Производственные и научные мощности ОПК позволяют производить весь спектр вооружений. От уровня развития ОПК зависит техническое перевооружение практически всех основных секторов экономики – транспорта, телекоммуникаций, ТЭК, здравоохранения и др. Немаловажен и социальный аспект: в 32 субъектах страны расположены 129 градообразующих организаций «оборонки». В таких регионах экономическая роль предприятий ОПК имеет определяющее значение [1–6].

Крупные компании ОПК России:

– ГК «Ростехнологии»;
– НПО «Сатурн»;
– «Моторостроитель»;
– ОАО «Концерн ПВО “Алмаз-Антей”»;
– ОАО «Мотовилихинские моторы»;
– ОАО «НПК “Уралвагонзавод”»;
– ОАО «Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”» [7].

Оборонно-промышленный комплекс в СССР и по настоящее время. По современным оценкам, в СССР на двух тысячах предприятий оборонного назначения было занято свыше 5 млн человек, среди них научных сотрудников было около одного миллиона.

Спустя четверть века общая численность сотрудников организаций ОПК составляет лишь 2 млн человек, в том числе около 1,3 млн человек – в оборонных отраслях промышленности. На современном этапе в структуру ОПК входит большинство высокотехнологичных наукоёмких отраслей промышленности. Они являются основой научно-технического потенциала России и определяют ключевые направления научно-технического прогресса.

В целом на фоне положительных мировых тенденций в освоении космоса, РКП России в 1990 гг. находилась в кризисном состоянии. За 10 лет (1990–2000 гг.) финансирование космонавтики существенно сократилось по многим направлениям в 15–20 раз. К 2000 г. космическая группировка сократилась в 2–2,5 раза, при этом 84 % космических аппаратов (КА), работающих на орбитах, выработали свой ресурс. Основными негативными тенденциями в этот период явились: резкое снижение объёмов производства в рамках государственного оборонного заказа, резкое снижение объёмов инвестиций (во время раздела имущеества космическая отрасль ввиду низкой рентабельности оказалась на втором плане), падение темпов обновления основных фондов практически до нуля, а также интенсивный отток из отрасли квалифицированного персонала. Это повлекло за собой подорожание разработок в области космических НИОКР, снижение качества и надёжности производимой техники и оборудования и утрату уникальных технологий. Единственным исключением стала программа коммерческих запусков, при реализации которой активно использовались снятые с вооружения и переоборудованные советские и российские межконтинентальные баллистические ракеты (такие, как сокращенные по договору СНВ-1 системы «Днепр», «Зенит» и «Рокот»). Благодаря этой программе удавалось получать хоть какие-то доходы, позволившие в 1990-х гг. спасти российскую космическую отрасль от полного краха [8].

Современная военно-политическая обстановка в мире характеризуется нестабильностью и напряженностью по многим направлениям международных государственных отношений. Применяемые для разрешения возникающих политических разногласий

методы все чаще стали носить «силовой» характер. Значение военной силы не только не уменьшилось, но и приобрело статус своеобразного аргумента отстаивания интересов в межгосударственных спорах и проблемах. Поэтому в сложившихся условиях одним из приоритетов российского государства является создание современной армии, оснащение которой должны составлять системы и комплексы вооружения и военной техники, обеспечивающие адекватное реагирование на весь спектр угроз военной безопасности [9].

Президентская программа развития. Современная история государственных программ вооружений (ГПВ) насчитывает 4 программы. ГПВ 1996–2005 гг., свернутая в 1999 г., ГВП 2001–2010 г., ориентированная на НИОКР, трансформированная благодаря высоким ценам на нефть в ГВП 2007–2015 гг., показавшую себя наиболее результативной. Отдельно стоит отметить новую ГПВ 2011–2020 гг. с беспрецедентными для современной России объемами финансирования в 23 трлн руб. [10].

В настоящее время в ракетно-космической промышленности разработаны и осуществляются 8 федеральных целевых программ:

– «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы»;

– «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2014–2020 годы»;

– «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности на период до 2020 года»;

– Федеральная космическая программа России на 2006–2015 годы;

– «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы»;

– «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы»;

– «Развитие российских космодромов на 2006–2015 годы»;

– Федеральная целевая программа развития образования на 2011–2015 годы.

Существенный недостаток вновь принятой ГПВ-2020 – это отказ от постулировавшей в ГПВ-2010 ориентации на НИОКР. Безусловно, из-за разрушения уникальной опытно-экспериментальной базы ОПК, постепенного выбывания ученых, связанных с этой отраслью, и слабой системности отдача от НИОКР крайне низка. Как сказал Дмитрий Медведев, деньги тратятся на модернизацию устаревшего, а НИОКР тянутся подчас не годы, а десятилетия.

На данный момент российский ОПК испытывает ряд трудностей, связанных прежде всего с экономическими и организационными пробелами. Механизмы субконтракции, активно и успешно применявшиеся в советском ОПК, частично нарушены, так что создание длинных технологических цепочек, необходимых для производства сложной техники, затруднено. Недостающие комплектующие заводам-изготовителям приходится зачастую производить самостоятельно, что негативно отражается на стоимости конечного изделия. Дополнительно ОПК испытывает трудности и с внедрением инноваций. Расходы на НИОКР в России составляют 1 % от ВВП (0,6 % – ОПК, 0,4 % – гражданская тематика), в развитых странах, государствах БРИКС эти затраты колеблются в пределах 2–3 % от ВВП. Очевидно, что именно с этим связана покупка необходимых оборонных технологий: вертолетоносцев «Мистраль», немецкой брони Rheinmetall, итальянских бронемашин Lynx.

Принятие новой Государственной программы вооружений (ГПВ-2020), обеспеченной существенными для современной России объемами финансирования в размере 23 трлн руб., должно кардинальным образом поменять ситуацию в секторе ОПК. Следует отметить, что почти 3 млрд руб. планируется направить на модернизацию предприятий ОПК.

Задачи по модернизации предприятий ОПК лежат не только в плоскости переоборудования этих предприятий и обновления кадрового ресурса, хотя решение подобных проблем для ряда предприятий является приоритетным. Весьма существенными задачами являются: последующая диверсификация предприятий ОПК, восстановление системы субконтрактинга путем выявления слабых звеньев в длинной цепочке производства продукции ОПК и их восстановления, повышение прозрачности предприятий ОПК в части справедливого распределения прибыли между контрагентами и, как следствие, привлечение частных инвестиций в сектор. Эти задачи лежат в смежных отраслях промышленности, между военной и гражданской областями этих отраслей. Эффективность развития ОПК во многом зависит от умелого применения современных экономических и управленческих методов [11].

Современное состояние. В наши дни, когда рыночные отношения в России набирают силу, необходимо использовать преимущества рыночного хозяйства для формирования новых экономических условий рынка оборонной промышленности и прорывного развития ОПК. Последние годы были трудными для оборонного комплекса. И дело не только в сокращении военных заказов государства. Процесс структурных реформ в ОПК шел медленно и противоречиво. Сохранялась иллюзия, что морально и технически устаревшая продукция будет востребована государством, а предприятия ОПК могут и дальше функционировать вне учета такой категории, как экономическая эффективность. Структура ОПК все ещё архаична и не отвечает современным военно-политическим задачам государства. Нельзя забывать, что сегодня Россия сталкивается с новыми угрозами, которые предъявляют к надежности национальной обороны принципиально иные, более высокие требования, чем раньше. Очевидно, что в новых условиях государство должно четко сформулировать и свои интересы, и свои приоритеты в сфере ОПК.

При этом необходимо заметить, что предприятия ОПК выступают одним из игроков на рынке оборонной промышленности, другим важным игроком является государство, что делает этот рынок специфичным и важным. Государство выступает в роли и покупателя, и регулирующего органа, который определяет правила игры и параметры развития российского ОПК. Оно заинтересовано в разработке и производстве новейших вооружений и военной техники,

поддержании наукоемких высокотехнологичных производств в ОПК. Это предъявляет особые требования к формированию государственной политики. Несмотря на достаточную разработанность конкретных проблем рынка оборонной промышленности и ОПК, приходится признать, что анализ закономерностей формирования рынка оборонной промышленности и особенностей функционирования предприятий ОПК комплексно не проводился [12].

Состояние, в котором сегодня находится ОПК, оценивается как кризисное. Это характеризуется следующими основными факторами:

– критическим состоянием научно-технической, элементной, материаловедческой и испытательной базы;

– нарушением процесса воспроизводства основных фондов, в том числе их активной части – процесс старения основных промышленно-производственных фондов опережает процессы обновления и прироста;

– ухудшением качества научных и производственных кадров, неполной занятостью персонала и низким (при высоких квалификационных требованиях) уровнем заработной платы, которая почти на треть ниже, чем в среднем по промышленности;

– слабой государственной поддержкой предприятий, выполняющих государственный оборонный заказ.

Текущий анализ состояния предприятий ОПК и реализации ряда федеральных целевых программ позволяет сделать 3 основных заключения:

1. ОПК развивается в основном на базе собственных ресурсов, что не соответствует ни потребностям обороны, ни задаче становления высокотехнологичного бизнеса.

2. Предприятия используют в основном научно-технический и производственный задел прошлых десятилетий; их способность разрабатывать и выпускать конкурентоспособную продукцию (в том числе указанную в Государственной программе вооружения) деградирует.

3. Существующая налоговая система является, мягко говоря, недружественной по отношению к высокотехнологичному комплексу.

Среди основных причин, непосредственно влияющих на снижение качества военной продукции, советник президента РФ выделил следующие:

– спад уровня научно-технических разработок и отсутствие положительной динамики их восполнения;

– снижение возможностей контроля за качеством военной продукции;

– отсутствие в стране производства ряда электро-, радио- и оптических изделий, использование импортных комплектующих;

– сокращение объемов испытаний изготавливаемой продукции;

– нарушение технологической дисциплины, снижение уровня квалификации отдельных категорий исполнителей вследствие утечки квалифицированных кадров и разрушения системы профессионального технического образования.

Совокупность перечисленных факторов ставит вопросы снижения качества военной продукции в ряд важнейших и подлежащих незамедлительному решению [13].

Посещение оборонных предприятий в разных регионах РФ показывает, что ключевые проблемы у предприятий оборонно-промышленного комплекса общие. В России наблюдается серьезное технологическое отставание российской оборонной промышленности от ведущих индустриальных держав. Моральное и физическое старение технологий, оборудования, выпускаемой продукции остановить до сих пор не удалось. На предприятиях ОПК используется оборудование, выпущенное в 70-х гг. прошлого века, износ которого иногда достигает 80 %, слабая элементная база, неспособность станкостроительной промышленности в полном объёме обеспечить предприятия «оборонки» даже металлорежущим инструментом.

Целый набор претензий вызывает практика осуществления государственного оборонного заказа. Сложные отношения между Минобороны и предприятиями ОПК не способствуют тому, чтобы отпущенные им значительные финансовые ресурсы, которые были бы нелишними, например, в социальной сфере, использовались строго по назначению и максимально эффективно.

Эксперты недовольны уровнем прозрачности оборонных расходов. Ситуация усугубляется и тем, что в России пока нет контрактного права, а есть ведомственные нужды. Это затрудняет контроль за эффективностью государственных расходов. В этой связи целесообразно ввести персональную ответственность за результаты реализации программ вооружения, выполнение пунктов гособоронзаказа. Среди других факторов, препятствующих модернизации ВПК – нехватка профессиональных кадров. Сегодня средний возраст работающих на предприятиях ОПК – 50 лет. Однако нельзя серьёзно говорить о притоке молодых кадров, пока средняя зарплата в оборонной отрасли будет составлять в пределах 20 тыс. руб. Также присутствует падение уровня политехнического образования в России. В управленческих структурах в сфере ОПК всё меньше специалистов с техническим образованием, всё больше менеджеров – специалистов по финансовым потокам, маркетингу и прочих специальностей.

Учитывая, что развитие военно-промышленного комплекса обусловлено научно-техническим прогрессом, ситуацию усугубляет отсутствие интереса среди молодежи к освоению технических профессий. По данным Председателя Совета Федерации Валентины Матвиенко, прошлой осенью недобор студентов по специальностям, нужным предприятиям ОПК, ракетно-космической отрасли, составил в среднем по России около 40 %. «По сути, идёт кадровое обескровливание важнейшего сектора экономики», – подчеркнула спикер. В качестве решения этой проблемы она предложила разработать специальный федеральный закон о целевой контрактной подготовке кадров для ОПК. Кроме того, В. Матвиенко рекомендовала развернуть пропаганду инженерных профессий в школах, на телевидении, в прессе.

Созданию современного высокотехнологичного оборонно-промышленного комплекса препятствуют

и некоторые недоработки на законодательном уровне. Так, в правовом поле до сих пор отсутствуют понятия «военно-промышленный комплекс» и «оборонно-промышленный комплекс».

Для придания импульса процессу модернизации ВПК нужно начать с азов – закрепить и раскрыть эти понятия в российском законодательстве.

Для решения всех этих непростых вопросов и успешной модернизации ВПК РФ требуется объединение усилий государства, бизнеса и общества. Совет Федерации готов задействовать весь потенциал профильных комитетов, а также Экспертного совета по проблемам законодательного обеспечения развития оборонно-промышленного комплекса при Председателе Совета Федерации.

Структурная реформа ОПК, которая направлена на концентрацию ресурсов, сейчас на стадии завершения. К началу текущего года в ОПК действуют 55 интегрированных структур, вобравших в себя основной военно-промышленный потенциал страны. В соответствии с федеральной целевой программой к 2020 г. должен быть сформирован новый конкурентоспособный облик военно-промышленного комплекса, который будет включать около 40 крупных компаний, способных к саморазвитию и эффективной работе.

Принимаемые в последнее время государством меры привели к увеличению доли выпуска военной продукции в общих объемах производства отрасли.

Рост инвестиций в отрасль в 2011 г. составил 116 % по отношению к уровню предшествующего года. Средства направляются на приобретение нового оборудования, модернизацию испытательной инфраструктуры, создание новых производственных мощностей. Темпы роста производства в ОПК превышают темпы в других отраслях промышленности.

Благодаря предпринимаемым усилиям в целом по ОПК наметилась тенденция к снижению оттока занятых. В течение трех лет на нужды отрасли будет направлено 354 млрд руб. капитальных вложений – почти в три раза больше, чем за период с 2008 по 2011 гг. Складывающаяся к настоящему времени ситуация позволяет сделать острожный вывод об улучшении положения в отрасли.

Касаясь проблем, с которыми сталкивается ОПК, заместитель Председателя Правительства РФ Дмитрий Рогозин остановился на вопросах реализации гособоронзаказа и положений рассчитанной до 2020 г. Государственной программы вооружений. Он констатировал возросшее количество рекламаций на выпускаемую ОПК продукцию, неисполнение контрактных обязательств. Он выразил беспокойство по поводу состояния инструментально-станочной базы производства и ценообразования. Все вопросы, по его словам, решаются, но состояние дел пока не удовлетворяет. Стратегическую задачу, которая стоит перед отечественным ОПК, вице-премьер сформулировал таким образом: добиться за счет гособоронзаказа стабильного производства на несколько лет вперед. Это, по его словам, позволит использовать «длинные деньги» на развитие производства, совершенствование всего комплекса. «Речь идет о новой индустриализации страны, – заявил Д. Рогозин. – Нам нужна умная “оборонка”, которая станет локомотивом модернизации России».

Технологическая модернизация ОПК позволит не только обеспечить армию и флот современным вооружением и техникой, но и использовать потенциал оборонного комплекса для технологического подъема гражданского сектора национальной экономики.

Развитие ВПК должно вписываться в общую промышленную политику государства. Важно удержать установленные цели паритетного – пятьдесят на пятьдесят – соотношения долей гражданской и военной продукции в общем объеме производства комплекса. Это позволит отраслям «оборонки» более устойчиво функционировать в условиях рынка и обеспечит загрузку тех организаций, которые не обладают достаточными объемами гособоронзаказа.

Государством планируются меры по модернизации ОПК, в том числе на основе государственно-частного партнерства. Все предпринимаемые страной усилия должны позволить комплексу к 2020 г. функционировать как рентабельному бизнесу.

Сегодня ядерно-оружейный комплекс страны полностью готов к выполнению задач по обеспечению обороноспособности России и способен вносить свой вклад в инновационное развитие страны. Отставание в оборонном секторе Росатома сохранялось вплоть до 2005–2006 гг. Ряд производств был утерян после распада Советского Союза, на грани закрытия находились некоторые заводы и научные учреждения, наблюдалось технологическое отставание в некоторых областях. В этот период Россия отставала по вычислительным мощностям от США в 20 раз, что было особенно чувствительно в условиях действующего запрета на ядерные испытания. По сути, это означало утрату возможностей по совершенствованию и развитию вооружений в соответствии с требованиями времени. В прошедший с того времени период ситуацию не только удалось переломить, но и добиться большего.

С принятием в 2006 г. программы развития ядерно-промышленного комплекса страны количество оборонных заказов для отрасли увеличилось более чем в 5 раз, а финансирование – в 4 с половиной раза. Это позволило восстановить инфраструктуру центрального полигона на Новой Земле, создать мощнейшую электронно-вычислительную базу, запустить рентгенографические комплексы, по своим характеристикам не уступающие, а подчас и превосходящие зарубежные аналоги. Сохранены все критические ядерные технологии и созданы производства, замещающие потерянные после распада СССР. На 121 % увеличился объём работ по заказам гражданских отраслей [14].

В последние годы в области обеспечения национальной безопасности и обороны страны подготовлены и приняты на государственном уровне важнейшие основополагающие документы, которые открывают перспективы качественно нового этапа инновационного развития оборонно-промышленного комплекса:

– Военная доктрина;
– Стратегия национальной безопасности;
– Основы военно-технической политики;

– Основы государственной политики в области развития ОПК;

– Государственная программа вооружения на 2011–2020 годы [15].

В марте 2010 г. Президентом России утверждены Основы государственной политики в области развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу, определившие основные стратегические ориентиры, приоритеты и задачи развития ОПК. По поручению Правительства России выполняется трехлетний план мероприятий по их реализации, предусматривающий в том числе формирование необходимой нормативно-правовой базы для обеспечения безопасного функционирования и развития ОПК.

Стратегией национальной безопасности Российской Федерации определены задачи в области обороны и безопасности страны. Одной из важнейших задач является переход к новому облику Вооруженных Сил Российской Федерации. Новому облику Вооруженных Сил должен соответствовать и новый конкурентоспособный облик ОПК.

В целях повышения конкурентоспособности организаций ОПК производится концентрация технологических, производственных, финансовых и кадровых ресурсов организаций. К началу 2011 г. практически завершено организационное реформирование ОПК. Созданы 53 интегрированные структуры, выпускающие около 60 % продукции ОПК.

Всего таких компаний, выпускающих как военную, так и профильную гражданскую продукцию, с учетом холдингов, создаваемых в составе Госкорпорации «Ростехнологии», будет около 70. В 2015 г. в них будет сосредоточен практически весь основной объём продукции ОПК.

В ряде отраслей уже осуществлен переход ко второй стадии интеграции – созданию мощных системообразующих интегрированных структур, объединяющих существенную часть потенциала организаций целых отраслей (подотраслей), таких как «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация», ОАО «Объединенная судостроительная корпорация» и ряд других.

С целью повышения эффективности имеющихся активов и снижения издержек проводятся мероприятия по реструктуризации и оптимизации производственных мощностей и других основных фондов в интегрированных структурах, входящих в состав ОПК.

Организована работа по подготовке программ инновационного развития акционерных обществ с государственным участием, государственных корпораций и федеральных государственных унитарных предприятий.

Реализация корпоративных программ интегрированных структур в тесной увязке с долгосрочными государственными программами должна позволить ОПК в условиях глобализации преодолеть технологическое отставание от ведущих зарубежных стран для создания нового поколения конкурентоспособной высокотехнологичной техники [16].

К концу 2015 года прогнозируется:

1. Создание в оборонно-промышленном комплексе системы многоуровневого непрерывного образования и долговременных условий для устойчивого развития кадрового потенциала оборонно-промышленного комплекса.

2. Формирование системы подготовки, переподготовки, повышения квалификации и закрепления кадрового потенциала, необходимого оборонно-промышленному комплексу для реализации задач по обеспечению национальной безопасности России, устойчивому промышленному росту и конкурентоспособности отечественной промышленности, повышению инвестиционной привлекательности, инновационной активности и конкурентоспособности организаций оборонно-промышленного комплекса, реализации федеральных целевых программ и стратегий развития оборонных отраслей промышленности.

3. Обеспечение соответствия качества научных работников, специалистов и рабочих кадров современным технологическим требованиям и мировым стандартам.

4. Создание эффективной системы закрепления, воспроизводства, продвижения и обновления кадрового потенциала оборонно-промышленного комплекса.

5. Развитие внутрифирменного обучения на новой учебно-технологической и методической основах, создание и модернизация материально-технической базы переподготовки, повышения квалификации специалистов и рабочих кадров на производстве, в том числе в средних и крупных организациях оборонно-промышленного комплекса.

6. Повышение значимости подготовки, переподготовки и повышения квалификации при периодической аттестации инженерно-технического персонала и руководителей от начального до высшего звена управления и формировании кадрового резерва руководителей различного уровня управления.

7. Снижение среднего возраста работников организаций оборонно-промышленного комплекса и профессорско-преподавательского состава, занятого в системе профессионального образования, за счет роста числа специалистов молодого и среднего возрастов.

8. Модернизация системы повышения квалификации и переподготовки профессорско-преподавательского состава, занятого в системе подготовки специалистов для оборонно-промышленного комплекса.

9. Повышение профессионально-квалификационной структуры кадрового потенциала оборонно-промышленного комплекса и профессорско-преподавательского состава в системе профессионального образования.

10. Повышение эффективности использования бюджетных средств, направляемых на развитие кадрового потенциала оборонно-промышленного комплекса.

11. Повышение доли внебюджетного софинансирования при подготовке (переподготовке) и повышении квалификации кадров для организаций оборонно-промышленного комплекса [17].

Заключение. Таким образом, современное состояние оборонно-промышленного комплекса России обусловливается отсутствием развития и спонсирования после развала СССР. На данный момент действует Российская государственная программа развития

вооружений на 2011–2020 гг., базирующаяся на прогнозе угроз национальной безопасности на 30-летний период и военно-технических данных на ближайшие 10 лет.

Библиографические ссылки

1. Казаков П. И. Оборонно-промышленный комплекс России в современных экономических условиях // Науч.-практ. конф. ученых и студентов с дис танционным участием [Электронный ресурс]. URL: http://sibac.info/10444 (дата обращения: 11.12.2014).

2. Королев В. Оборонно-промышленный комплекс России: вопросы регулирования // Проблемы теории и практики управления : Междунар. журнал. 1999. № 4.

3. Путь РФ: Новости промышленности [Электронный ресурс]. URL: http://путь.рф/industry/24 (дата обращения: 04.12.2014).

4. Кадры для ОПК России [Электронный ресурс]. URL: http://kadry-opk.ru/opk (дата обращения: 04.12.2014).

5. Википедия: Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Оборонно-промышленный_комплекс_России (дата обращения: 04.12.2014).

6. Обозник: информационно-тематический портал [Электронный ресурс]. URL: http://www.oboznik.ru/?p=17891 (дата обращения: 07.12.2014).

7. Российские компании, которые получат господдержку. Полный список // Сетевое издание «РИА Новости» [Электронный ресурс]. 2008. URL: http://ria.ru/crisis/20081225/158098785.html (дата обращения: 18.12.2014).

8. Ерыгина Л. В., Сердюк Р. С. Состояние российской ракетно-космической промышленности и тенденции её развития // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С. 207–212.

9. Поповкин В. Перспективное вооружение и военная техника – основа нового облика Вооруженных сил России // Военный парад. 2009. № 3 (93).

10. Зазимко В. Н. Для роста производства прописали кластеры [Электронный ресурс] // Газета «Независимое военное обозрение». 2012. URL: http://nvo.ng.ru/armament/2012-04-13/1_clastery.html (дата обращения: 11.12.2014).

11. Фирулев О. В., Ерыгин Ю. В. Современное состояние и перспективы совершенствования форм и методов участия государства в развитии инновационной деятельности на предприятиях ракетно-космической отрасли // Вестник СибГАУ. 2014. № 2 (54). С. 179.

12. Шипигин Ю. А. Оборонно-промышленный комплекс в современной экономике России : дис. … к-та экон. наук. М. : МГУ им. Ломоносова, 2004. 1 с.

13. Костин Д. Развитие ОПК России // Военно-промышленный курьер : общероссийская еженедельная газета. 2005. № 9 (76).

14. Портал машиностроения [Электронный ресурс]. URL: http://www.mashportal.ru/machinery_news-22789.aspx (дата обращения: 01.12.2014).

15. Центр анализа мировой торговли оружием [Электронный ресурс]. URL: http://www.armstrade.org/includes/periodics/news/2012/0125/133511299/detail.shtml (дата обращения: 10.12.2014).

16. В целях технологического развития в ОПК разработаны, утверждены и реализуются более 10 федеральных программ – Минпромторг [Электронный ресурс] // сетевой журнал «Национальная оборона». 2012. URL: http://www.armstrade.org/includes/periodics/news/2012/0125/133511299/detail.shtml (дата обращения: 20.12.2014).

17. Об утверждении Стратегии создания в оборонно-промышленном комплексе системы многоуровневого непрерывного образования на период до 2015 года : Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 13 апреля 2009 года № 256 [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/902152563 (дата обращения: 20.12.2014).

References

1. Kazakov P. I. [The military-industrial complex of Russia in the contemporary economic conditions]. *Nauchno-prakticheskie konferentsii uchenykh i studentov s distantsionnym uchastiem* (In Russ.). URL: http://sibac.info/10444 (accessed 11.12.2014).

2. Korolev V. [The military-industrial complex of Russia: regulatory issues]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya*, 1999, vol. 4 (In Russ.).

3. *Put'.RF: Novosti promyshlennosti* [Path.RF: news from industry]. Available at: http://путь.рф/industry/24 (accessed 04.12.2014).

4. *Kadry dlya OPK Rossii* [keyframes for the defense industry of Russia]. Available at: http://kadry-opk.ru/opk (accessed 04.12.2014).

5. *Vikipediya: Svobodnaya entsiklopediya* [Wikipedia: Free encyclopedia]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Oboronno-promyshlenny_kompleks_Rossii (accessed 04.12.2014).

6. *Informatsionno-tematicheskiy portal "Oboznik"* [Information-thematic portal "Bosnic"]. Available at: http://www.oboznik.ru/?p=17891 (accessed 07.12.2014).

7. *Setevoe izdanie "RIA Novosti"* [Russian companies, which will receive state support. The full list]. *Rossiyskie kompanii, kotorye poluchat gospodderzhku. Polnyy spisok*. 2008. (In Russ.) Available at: http://ria.ru/crisis/20081225/158098785.html (accessed 18.12.2014).

8. Erygina L. V., Serdyuk R. S. [The state of the Russian rocket and space industry and the tendencies of its development]. *Vestnik SibGAU.* 2014, no. 1 (53), p. 207–212 (In Russ.).

9. Popovkin V. [Promising armament and military equipment is the basis of the armed forces of Russia]. *Voennyy parad*. 2009, no. 3 (In Russ.).

10. Zazimko V. N. *Dlya rosta proizvodstva propisali klastery* [To increase the production of ordered clusters]. Available at: http://nvo.ng.ru/armament/2012-04-13/1_clastery.html (accessed 11.12.2014).

11. Firulev O. V., Erygin Yu. V. [Current state and prospects of improving the forms and methods of state

participation in the development of innovative activities in enterprises of rocket and space industry]. *Vestnik SibGAU.* 2014, no. 2 (54), p. 179 (In Russ.).

12. Shipigin Yu. A. *Oboronno-promyshlennyy kompleks v sovremennoy ekonomike Rossii. Dis. na sois. uchenoy stepeni k-ta ekonom. nauk.* [The military-industrial complex in the modern economy of Russia. Diss. on comp. of a sci. degree of cand. of ec. sci.]. Moscow, LMSU Publ., 2004, 1 p.

13. Kostin D. [The development of the defence industry of Russia]. *Voenno-promyshlennyy kur'er*. 2005, no. 9 (In Russ.).

14. Portal mashinostroeniya [Portal engineering]. Available at: http://www.mashportal.ru/machinery_news-22789.aspx (accessed 01.12.2014).

15. Tsentr analiza mirovoy torgovli oruzhiem [Center for analysis of world arms trade]. Available at: http://www.armstrade.org/includes/periodics/news/2012/0125/133511299/detail.shtml (accessed 10.12.2014).

16. [For technological development in the PCR developed, approved and implemented more than 10 Federal programs - the Ministry of industry and trade]. *Setevoe zhurnal "Natsional'naya oborona"* (In Russ.). Available at: http://www.armstrade.org/includes/periodics/news/2012/0125/133511299/detail.shtml (accessed 20.12.2014).

17. *Prikaz ministerstva promyshlennosti i torgovli Rossiyskoy federatsii "Ob utverzhdenii Strategii sozdaniya v oboronno-promyshlennom komplekse sistemy mnogourovnevogo nepreryvnogo obrazovaniya na period do 2015 goda" ot 13 aprelya 2009 goda № 256* [Order of the Ministry of industry and trade of the Russian Federation "On approval of the Strategy creation in the military-industrial complex multilevel system of continuing education for the period till 2015" of April 13, 2009, № 256. (In Russ.) Available at: http://docs.cntd.ru/document/902152563. (accessed 20.12.2014).

© Латышенок Д. К., 2015

УДК 658.5

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 261–267

ТИПОЛОГИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ РАБОЧИХ КАДРОВ ПРЕДПРИЯТИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

У. С. Подвербных

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail verba07.90@mail.ru

Для аэрокосмической отрасли, где создаются уникальные технические системы, используются передовые достижения науки, реализуются прорывные технологии, задача подготовки рабочих кадров приобретает особое значение. В то же время, сложившиеся за последний год приоритеты количественного роста и импортозамещения аэрокосмической продукции отечественной экономики накладывают на систему подготовки рабочих кадров аэрокосмического предприятия условия обеспечения компетентности рабочих как ключевого результата их профессиональной подготовки.

Целью данного исследования является анализ и систематизация типов компетенций рабочих кадров в единую типологию компетенций с учетом стратегических приоритетов развития предприятий аэрокосмической отрасли.

Задачами исследования определены: обоснование актуальности компетентностного подхода к подготовке рабочих кадров в аэрокосмической отрасли; анализ существующих исследований в области типологий компетенций; определение совокупности кластеров и типов компетенций рабочего в типологии.

Определен состав факторов, актуализирующих использование компетентностного подхода к подготовке рабочих кадров: потребность в осознании рабочим высокой «цены» решения на отдельном рабочем месте; необходимость корректной оценки индивидуального вклада конкретного рабочего в уникальный производственный результат, это связано со спецификой единичного или мелкосерийного производства на аэрокосмическом предприятии; включение в оценку труда рабочего его личностных качеств, обеспечивающих мотивацию к росту производительности труда; высокая адаптивность модели компетенций при подборе, мотивации, оценке и развитии рабочих кадров.

Предложено выделить два подхода к пониманию сущности компетенций: деятельностно-мотивационный подход (компетенция как готовность действовать) и описательный подход (компетенция – это совокупность характеристик сотрудника). Указывается, что в отношении компетенций рабочих кадров наиболее обоснована ориентация на деятельностно-мотивационный подход, который подчеркивает готовность и способность проявить полученные в результате подготовки знания, навыки в профессиональной деятельности.

Проанализирован ряд типологий компетенций отечественных и зарубежных авторов. Предлагается типизировать компетенции рабочего как корпоративные, личностные и профессиональные, что позволит наиболее точно учитывать отраслевую специфику при структурировании и типизации компетенций, а также фокусировать типологию на отдельных категориях персонала, в данном случае, на категории рабочих кадров.

Ключевые слова: компетенции, рабочие кадры, аэрокосмическая отрасль, типологии, система подготовки.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 261–267

COMPETENCES TYPOLOGY FOR AEROSPACE ENTERPRISE WORKERS

U. S. Podverbnikh

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: verba07.90@mail.ru

The problem of workforce training is a particularly relevant in the aerospace industry, because the aerospace industry is an area where the unique technical systems are created, cutting-edge science is used, breakthrough technologies are implemented. At the same time, last priorities of quantitative growth of import substitution and domestic economy aerospace products are applied to a system of training skilled workers aerospace companies insurance that the competence of working conditions it is a key result of their training.

The purpose of this study is to analyze and systematize the types of workforce competences in a single competence typology, taking into account the strategic priorities of the aerospace industry.

The objectives of the study are the following: relevance justification of the competence approach to training workers in the aerospace industry; analysis of existing researches in the field of competences typologies; determination of clusters set and types of competences in working typology.

The composition of factors which actualize the use of competency approach to workforce training is the following: the awareness need for workers with high "price decision" on a separate workplace; *the need for properly evaluation of individual contribution of a specific worker in a unique manufacturing result. (this is connected to the specifics of individual and small-scale production at the aerospace company); inclusion in the evaluation of worker's labor his personal qualities, which provide motivation for productivity increase; high adaptability of competency model in the selection, motivation, evaluation and workforce development.*

Two approaches are provided to the understanding of competence essence: activity – motivational approach (competence as a willingness to act) and the descriptive approach (competence – a set of employees characteristics).

Activity-motivational approach is the most relevant approach to the workforce competences. This approach underlines the willingness and ability to show professional activities as a result of learning knowledge skills.

The author analyzed a number of competences typologies of domestic and foreign scholars.
The author proposes to typify the working competences as a corporate, personal and professional. This method allows taking into account the most accurate industry-specific during the structuring and typing competences. Moreover, this method will allow us to focus on the certain staff categories including the category of workers.

Keywords: competence, workforce, aerospace industry, typology, training system.

Введение. Аэрокосмическая отрасль – одна из наиболее динамично развивающихся, наукоемких, прибыльных и перспективных в мировой экономике. При соблюдении ряда условий в ближайшие 20–30 лет наша страна сможет определять развитие этого направления в мировых масштабах. Лидерство в области космических программ сможет обеспечить первенство в области связи, навигации, в создании оборонных систем, интенсивном развитии информационных технологий.

Для аэрокосмической отрасли, где создаются уникальные технические системы, используются передовые достижения науки, реализуются прорывные технологии, задача подготовки рабочих кадров приобретает особое значение. В то же время, сложившиеся за последний год приоритеты количественного роста и импортозамещения аэрокосмической продукции отечественной экономики накладывают на систему подготовки рабочих кадров аэрокосмического предприятия условия обеспечения компетентности рабочих как ключевого результата их профессиональной подготовки.

Целью данного исследования является анализ и систематизация типов компетенций рабочих кадров в единую типологию компетенций с учетом стратегических приоритетов развития предприятий аэрокосмической отрасли.

Задачами исследования определены:

– обоснование актуальности компетентностного подхода к подготовке рабочих кадров в аэрокосмической отрасли;

– анализ существующих исследований в области типологий компетенций;

– определение совокупности кластеров и типов компетенций рабочего в типологии.

Компетентностный подход к подготовке рабочих кадров в аэрокосмической отрасли. За последнее десятилетие в нашей стране проблема осознания и реализации компетентностного подхода к подготовке кадров выдвинулась в разряд одной из наиболее актуальных как для исследователей, так и для практиков.

Н. А. Гришанова [1] отмечает, что основными характеристиками современных общественных процессов являются:

1) усиление фактора динамизма и неопределенности;

2) изменение стилей жизни на всех уровнях: глобальном, социальном, организационном, индивидуальном;

3) внедрение рыночных механизмов в профессиональное обучение;

4) возрастание роли горизонтальной мобильности в течение трудовой жизни;

5) принципиальная трансформация многих профессий, их глобализация и ускоренная демаркация;

6) усиление роли и усложнение задач личностного развития («умения на всю жизнь»);

7) децентрализация ответственности за качество работы.

Трансформируя данные факторы на специфику высокотехнологичного аэрокосмического производства, автор предлагает дополнить данную классификацию следующими факторами:

– потребность в осознании рабочим высокой «цены» решения на отдельном рабочем месте;

– необходимость корректной оценки индивидуального вклада конкретного рабочего в уникальный производственный результат, это связано с спецификой единичного или мелкосерийного производства на аэрокосмическом предприятии;

– включение в оценку труда рабочего его личностных качеств, обеспечивающих мотивацию к росту производительности труда;

– высокая адаптивность модели компетенций при подборе, мотивации, оценке и развитии рабочих кадров.

Считается, что термин «компетенция» ввел в обращение Р. Уайт в 1959 г. в работе «Motivation reconsidered: the concept of competence» для описания тех способностей выпускника учебного заведения, которые наиболее тесно связаны с его хорошей работой

на основе полученной подготовки и сформированной в процессе обучения высокой мотивацией к ее выполнению [2]. Постулируя взаимосвязь между когнитивными компетенциями и мотивационными тенденциями, Уайт определил компетентность как «…эффективное взаимодействие человека с окружающей средой…» и утверждал, что в числе личностных характеристик выпускника должна быть «компетентностная мотивация» в дополнение к компетенции, которую можно трактовать как сформированную способность. Следуя этому теоретическому подходу, в США для оценивания компетенций стали разрабатывать компетентностные тесты, позволяющие предсказывать эффективность в работе после окончания подготовки с высокой прогностической валидностью [3].

На сегодняшний день можно укрупненно выделить два подхода к пониманию сущности компетенций. В таблице трактовки компетенций различных авторов сгруппированы на основе деятельностно-мотивационного подхода (компетенция как готовность действовать) и описательного подхода (компетенция – это совокупность характеристик сотрудника).

Авторы придерживаются мнения о том, что в отношении компетенций рабочих кадров наиболее обоснована ориентация на деятельностно-мотивационный подход, который подчеркивает готовность и способность проявить полученные в результате подготовки знания и навыки в профессиональной деятельности.

Анализ существующих типологий компетенций. Для обоснованного выбора типов компетенций рабочих кадров аэрокосмической отрасли обратимся к уже имеющимся типологиям компетенций рабочих.

На рис. 1 [13] показаны три основных подхода к определению компетентностной трактовки качества результатов подготовки. Эти подходы появились независимо друг от друга сначала в США, затем в Великобритании и в последнюю очередь во Франции и Германии.

Предложенный подход успешно объединяет в метакомпетенции когнитивные, функциональные и социальные компетенции.

Необходимо отметить, что в 1973 г. В. Тарасовым был разработан метод идентификации личности по деловым характеристикам, на основании которого была разработана система автоматизированной аттестации руководителей и специалистов (СААРС), получившая широкое распространение в Советском Союзе [14]. Словарь деловых характеристик В. Тарасова по сути является аналогом модели компетенций в принятом на Западе и в США понимании.

В исследованиях отечественных и зарубежных авторов приводится множество разнообразных типологий компетенций. Английские исследователи М. Бернс, С. Крамш, С. Савиньон в структуре компетентности выделяют три уровня [15]:

– интегративная компетентность – это способность к интеграции знаний и навыков и их использованию в практической жизнедеятельности;

– психологическая компетентность, представляющая развитую систему эмоций, способную обеспечить адекватное восприятие окружающего мира и практическое поведение людей;

– компетентность в конкретных сферах деятельности, выражающуюся в умении работать с людьми, преодолевать неопределенность, реализовывать намеченные планы и т. д.

Анализ подходов к трактовке понятия «компетенция»

Определения деятельностно-мотивационного подхода	Определения описательного подхода
Компетенция основывается на знаниях, конструируется через опыт, реализуется на основе воли (Джон Эрпенбек) [4]	Знание и понимание того, как действовать в различных профессиональных и жизненных ситуациях (проект TUNING – Настройка образовательных структур в Европе) [5]
Компетенция – способность применять знания, умения, навыки и личностные качества для успешной деятельности в различных проблемных профессиональных либо жизненных ситуациях (ФГОС-3) [6]	Компетенции – это интегрированные характеристики качеств личности, позволяющие осуществлять деятельность в соответствии с профессиональными и социальными требованиями, а также личностными ожиданиями (И. А. Зимняя) [7]
Интегральные надпредметные характеристики подготовки обучаемых, которые проявляются в готовности к осуществлению какой-либо деятельности в конкретных проблемных ситуациях в процессе или после окончания обучения (В. И. Звонников) [3]	Совокупность знаний, умений, навыков и способов деятельности, необходимых для качественной продуктивной деятельности после обучения (А. В. Хуторской) [8]
Способность эффективного выполнения конкретных действий в предметной области, включая узкопредметные знания, особого рода предметные навыки, способы мышления, понимание ответственности за свои действия (Дж. Равен) [9]	Любые индивидуальные характеристики, которые поддаются надежному измерению и которые могут продемонстрировать разницу между эффективным и неэффективным исполнением (Л. Спенсер, С. Спенсер) [10]
Способность применять имеющиеся знания и умения в новых ситуациях профессиональной жизни, проявляющаяся в организации и планировании работы, в необычных ситуациях и нововведениях (Р. Бояцис) [11]	Любые индивидуальные характеристики, которые можно измерить или достоверно подсчитать и относительно которых можно утверждать, что они значимы для различения эффективного и неэффективного выполнения работы (Л. Спенсер, С. Спенсер) [10]
Способность выполнить специфическую деятельность по предписанному стандарту (Т. Хайланд) [4]	Индивидуальная особенность, способствующая высокому качеству выполнения работы на определенной позиции в конкретном организационном контексте (М. Армстронг) [12]

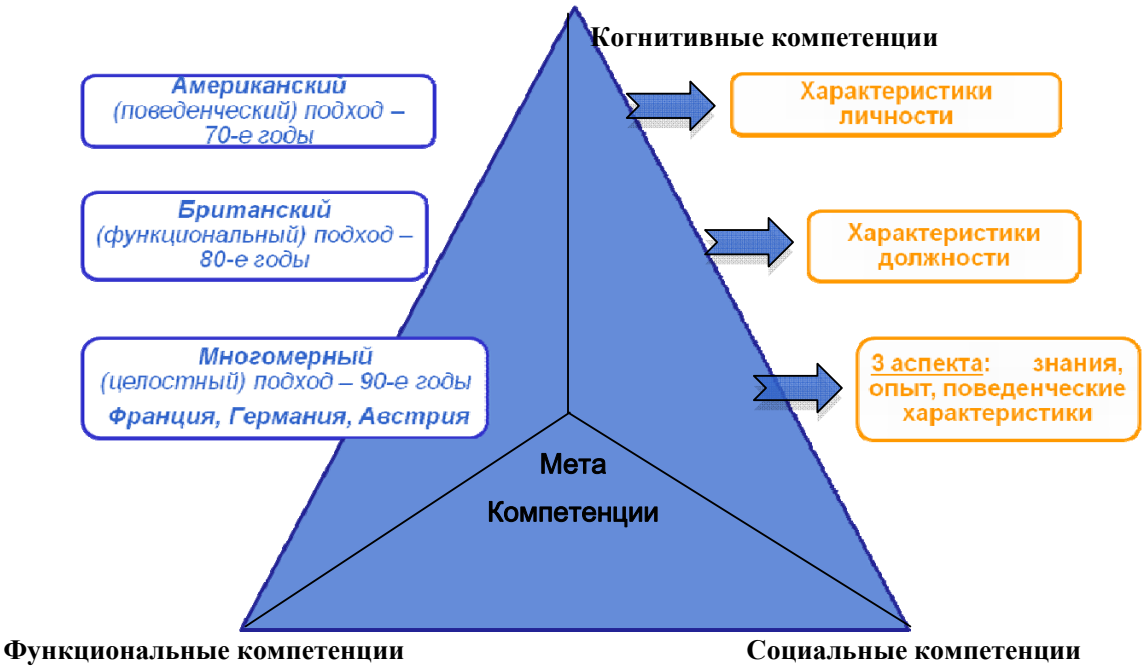


Рис. 1. Эволюция взглядов на типы компетенций
и их использование в практике подготовки кадров

М. Мескон, М. Альберт, Ф. Хедоури [16] компетентность представляют интегральным понятием, где выделяются следующие уровни:

– компетентность – способность к интеграции знаний и навыков и их использованию в условиях быстроменяющихся требований внешней среды;

– концептуальная компетентность;

– компетентность в эмоциональной сфере, в области восприятия;

– компетентность в отдельных сферах деятельности.

В трудах известного британского психолога Дж. Равена впервые обращено внимание на психологическую природу компетентности, на проблемы ее формирования на разных возрастных ступенях развития человека.

Компонентами компетентности ученый считает те «характеристики и способности людей, которые позволяют им достигать личностно значимых целей – независимо от природы этих целей и социальной структуры, в которой эти люди живут и работают». Эти компоненты компетентности разделены на когнитивные (определение препятствий на пути достижения целей), аффективные (удовольствие от работы) и волевые (настойчивость, решимость, воля). Дж. Равен утверждает, что для разных сфер деятельности необходим и разный набор компетентностей [9].

К технической (профессиональной) компетентности относятся не затраченные усилия, а реальные результативные характеристики профессиональной деятельности [13].

Классификация четырех способов определения компетенций в Глоссарии терминов рынка труда, разработки образовательных программ и учебных планов Европейского фонда образования (1997) включает:

– компетенции, основанные на параметрах личности;

– компетенции, основанные на выполнении задач и деятельности;

– компетенции, основанные на выполнении производственной деятельности;

– компетенции, основанные на управлении результатами деятельности [17].

Лайн и Сайн Спенсеры обобщили опыт 286 исследований, проведенных в разных типах организаций, и на этой основе составили словарь, включающий 21 компетенцию, которые были структурированы в шесть кластеров:

1) достижение и действие;
2) помощь и обслуживание других;
3) воздействие и оказание влияния;
4) менеджерские компетентности;
5) когнитивные компетентности;
6) личная эффективность [10].

Американская ассоциация менеджмента (AMA) при классификации компетенций выделила пять кластеров, в число которых вошли ресурсные, межличностные, информационные, системные и технологические компетенции. Связь между различными кластерами компетенций и их дифференциация, по мнению разработчиков этого подхода, должна осуществляться в процессе моделирования ключевых факторов успеха и оценивания уровня их сформированности в отдельных кластерах [10].

При решении проблем психологического обеспечения управления профессиональной деятельностью в организации Г. Б. Морозова определила следующие виды компетентности [18]:

– поведенческая (индивидуальная) компетентность – характеризует индивидуальность человека при выполнении им своих профессиональных обязанностей, «мягкие требования» к работнику;

– техническая (профессиональная) компетентность – характеризует получаемый результат, она связана со стандартами выполнения профессиональных обязанностей, «жесткие требования» к работнику.

К поведенческой (индивидуальной) компетентности могут относиться, например, навыки межличностного общения, аналитические способности, ориентация на достижение, т. е. такие характеристики, которые могут быть извлечены из анализа поведения работника при выполнении им своих профессиональных обязанностей.

В. Д. Шадриков, анализируя различные подходы к классификациям и определению компетенций при профессиональной подготовке рабочего, предлагает выделять следующие три группы компетенций [19]:

1) социально-личностные компетенции (относящиеся к человеку как к индивиду, субъекту деятельности и личности);

2) общепрофессиональные компетенции (информационные, расчетные, эксплуатационные, управленческие, организационные, конструкторские, проектировочные, экономические);

3) специальные компетенции (профессионально-функциональные знания и умения, которые обеспечивают привязку к конкретному предмету труда).

Н. А. Карташева выделяет следующие типы компетенций [20].

– функциональная (профессиональная, специальная) – профессиональные знания, навыки, образование, деловая надежность, способность успешно и безошибочно осуществлять свою должностную деятельность и проектировать свое дальнейшее профессиональное развитие;

– интеллектуальная – способность к аналитическому мышлению, логике, анализу и синтезу, построению гипотез, владение способами личностного самовыражения и саморазвития, способность к научным обоснованиям и творческому решению проблем;

– ситуативная – адаптационная способность действовать в соответствии с ситуацией, выбирая из множества способов поведения наиболее эффективный в данных ситуационных условиях производства;

– социальная – наличие коммуникативных навыков и способностей к бесконфликтному общению, умение сотрудничать, поддерживать добрые отношения с людьми, оказывать социальную и психологическую помощь, эффективно взаимодействовать в команде, демонстрировать гибкость и искусство влияния, осуществлять неформальное лидерство.

Определение кластеров и типов компетенций рабочего в типологии компетенций. Как видим из проведенного анализа, дифференциация типологий компетенций по категориям рабочих кадров находит ограниченное отражение в теории менеджмента человеческих ресурсов. В исследованиях практически отсутствует обоснование важности разработки и использования моделей компетенций для рабочих кадров. И, наконец, несмотря на то, что многие исследователи указывают на корреляцию между типами компетенций и спецификой предметов труда, отраслевой подход к формированию типологии компетенций также нуждается в детальном анализе и разработке.

В то же время видим, что профессиональные (функциональные, технические) компетенции имеются в большинстве указанных выше типологий, также практически в каждой типологии присутствуют социально-личностные компетенции.

Известно, что типовыми оценочными индикаторами результативности труда рабочего является производительность труда (выработка, трудоемкость работ и операций), уровень брака, максимизация использования оборудования. Ведущее значение профессиональных компетенций для рабочих, в особенности аэрокосмических предприятий, не вызывает сомнений. Эта точка зрения созвучна с позицией представителей британской школы психологии труда, придерживающихся функционального подхода, согласно которому под профессиональными компетенциями понимается способность действовать в соответствии со стандартами выполнения работы. Данный подход основан на стандартах деятельности рабочего – рабочей инструкции, ЕТКС. Для предприятий аэрокосмической отрасли в основе профессиональных компетенций могут также использоваться бизнес-процессы, конструкторско-технологическая документация изделия (рис. 2).

Рис. 2. Типология компетенций рабочих кадров предприятий аэрокосмической отрасли

Нужно отметить, что достаточно небольшое количество организаций оценивают личностные качества рабочих, тем более разрабатывают и применяют модели компетенций рабочих. Однако в холдинге «СИБУР» уже более трех лет успешно реализуется компетентностный подход к оценке и управлению подготовкой рабочих кадров. В аэрокосмической промышленности компетенции используются для оценки рабочих в объединенной авиастроительной корпорации. Также АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» разработало и внедряет модель компетенций рабочего-станочника широкого профиля. Каждая из моделей компетенций в данных компаниях включает раздел личностных или социально-личностных компетенций. Высокая сложность и уникальность предметов труда рабочего на аэрокосмическом предприятии по сути определяет необходимость оценки и управления вознаграждением рабочего, исходя из его ответственности, готовности поддерживать стандарты, ориентации на качество и т. д.

Наконец, включение в типологию компетенций рабочих кадров корпоративных компетенций обосновано как минимум с двух позиций. Во-первых, рабочие основного производства, занятые в изготовлении изделий аэрокосмического предприятия, по определению должны обладать лояльностью и пониманием значимости, престижности и высокой «цены» собственных действий и операций на рабочем месте. Во-вторых, исторически сложилось, что на таких предприятиях всегда присутствовал высокий уровень производственной культуры, понимание задач коллектива. За последние десятилетия многое из этого было утеряно, особенно по наиболее уязвимой для рынка категории рабочих. Установление корпоративных компетенций в качестве ориентира отбора, оценки, мотивации, развития рабочих кадров аэрокосмического предприятия способно решить данную проблему.

Заключение. Краткий анализ имеющихся и прогнозируемых проблем и тенденций подготовки рабочих кадров на предприятиях аэрокосмической отрасли, изучение и синтез существующих взглядов на структуру компетенций рабочих указывает на необходимость выделения и дальнейшего декомпозирования на кластеры и типы таких групп компетенций рабочих кадров, как корпоративные, профессиональные, личностные компетенции. При этом в основе создания и использования на основе данной типологии конкретных моделей компетенций должна лежать надежная и валидная информация о системе подготовки рабочих на предприятии, а также в образовательных организациях. Для ее получения необходимо выполнить развернутый анализ подходов к проектированию системы подготовки, интегрировать стандарты профессий рабочих, модели компетенций, государственные и корпоративные стандарты обучения, сформировать репрезентативную совокупность показателей качества подготовки. В конечном итоге, это позволит разработать научно обоснованную методику формирования системы подготовки компетентных рабочих кадров на предприятии на основе стратегических приоритетов его развития.

Библиографические ссылки

1. Гришанова Н. А. Компетентностный подход в обучении взрослых. М. : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2004. 69 с.

2. White R. W. Motivation reconsidered: the concept of competence // Pcychological review. 1959. Vol. 66. P. 297–333.

3. Звонников В. И., Челышкова М. Б. Контроль качества обучения при аттестации: компетентностный подход. М. : Университетская книга, 2009. 330 с.

4. Балансировать компетенции: на пути к европейскому учету компетенций / Дж. Эрпенбек [и др.]. Мюнстер : Ваксман, 2006. 294 с.

5. Проект TUNING – Настройка образовательных структур в Европе [Электронный ресурс] URL: http://www.hse.ru/org/hse/iori/pr15 (дата обращения: 03.12.2014).

6. Федеральные государственные образовательные стандарты [Электронный ресурс] URL: http://www.Минобрнауки.рф/%D0/B4%. (дата обращения: 10.10.2014).

7. Зимняя И. А. Ключевые компетентности как результативно-целевая основа компетентностного подхода в образовании. М. : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2004. 42 с.

8. Хуторской А. В. Компетентностный подход в обучении. М. : Эйдос, 2013. 73 с.

9. Равен Дж. Компетентность в современном обществе: выявление, развитие и реализация. М. : Когито-Центр, 2002. 396 с.

10. Спенсер Л., Спенсер С. Компетенции на работе. М. : Гиппо, 2010. 587 с.

11. Boyatzis R. E. The competent manager: a model for effective performance. New York : Wiley, 1982. 327 p.

12. Армстронг М. Практика управления человеческими ресурсами. СПб. : Питер, 2009. 696 с.

13. Эрпенбек Дж., Розенштиль Л. Справочник по измерению компетенций: выявление, понимание и оценка компетенций в производственной, педагогической и психологической практике. Штудгарт : Шэфель-Поэшель, 2007. 796 с.

14. Таллиннская школа менеджеров. [Электронный ресурс] URL: http://www.tarasov.ru/ about/tarasov. (дата обращения: 10.11.2014).

15. Ганс Д. Компетенции – приобретение, учет, инструменты. Мюнхен : Билефельд, 2007. 140 с.

16. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента. М. : Вильямс, 2009. 855 с.

17. Глоссарий терминов рынка труда, разработки образовательных программ и учебных планов. М. : Европейский фонд образования, 1997. 160 с.

18. Морозова Г. Б. Психологическое сопровождение организации и персонала. СПб. : Речь. 2006. 400 с.

19. Шадриков В. Д., Дружинин А. Е. Формирование подсистемы профессионально важных качеств в процессе профессионализации. Ярославль : Изд-во Ярославского ун-та, 1979. 34 с.

20. Карташева Л. В. Организационное поведение. М. : Инфра-М, 2008. 384 с.

References

1. Grishanova N. A. *Kompetentnostnyy podkhod v obuchenii vzroslykh* [Competence approach in adult learning]. Moscow, Issledovatel'skiy tsentr problem kachestva podgotovki spetsialistov Publ., 2004, 69 p.
2. White R. W., Motivation reconsidered: the concept of competence. *Pcychological review*, 1959. vol. 66, p. 297–333.
3. Zvonnikov V. I., Chelyshkova M. B. *Kontrol' kachestva obucheniya pri attestatsii: kompetentnostnyy podkhod* [Quality control training for certification: competence approach]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2009, 330 p.
4. Erpenbek Dzh., Khasler B., Shnitger M. *Balansirovat' kompetentsii: na puti k evropeyskomu uchetu kompetentsiy* [Balance of competence: towards European integration competence]. Munster, Waxman Publ., 2006, 294 p.
5. *Proekt TUNING – Nastroyka obrazovatel'nykh struktur v Evrope* [The project TUNING - Tuning Educational Structures in Europe]. Available at: http://www.hse.ru/org/hse/iori/pr15 (accessed: 03.12.2014).
6. *Federal'nye gosudarstvennye obrazovatel'nye standarty* [Federal state educational standards]. Available at: http://www.Минобрнауки.рф/%D0/B4% (accessed: 10.10.2014).
7. Zimnyaya I. A. *Klyuchevye kompetentnosti kak rezul'tativno-tselevaya osnova kompetentnostnogo podkhoda v obrazovanii* [Key competence as effectively-targeted competency-based approach to education]. Moscow, Issledovatel'skiy tsentr problem kachestva podgotovki spetsialistov Publ., 2004, 42 p.
8. Khutorskoy A. V. *Kompetentnostnyy podkhod v obuchenii* [Competence approach in teaching]. Moscow, Eydos Publ., 2013, 73 p.
9. Raven Dzh. *Kompetentnost' v sovremennom obshchestve: vyyavlenie, razvitie i realizatsiya* [Competence in modern society: the identification, development and implementation]. Moscow, Kogito-Tsentr Publ., 2002, 396 p.
10. Spenser L., Spenser S. *Kompetentsii na rabote* [Competence at work]. Moscow, Gippo Publ., 2010, 587 p.
11. Boyatzis R. E. The competent manager: a model for effective performance. New York, Wiley, 1982, 327 p.
12. Armstrong M. *Praktika upravleniya chelovecheskimi resursami* [The practice of human resource management]. St.Petersburg, Peter Publ., 2009, 696 p.
13. Erpenbek Dzh., Rozenshtil' L. *Spravochnik po izmereniyu kompetentsiy: vyyavlenie, ponimanie i otsenka kompetentsiy v proizvodstvennoy, pedagogicheskoy i psikhologicheskoy praktike* [Handbook on the measurement of competencies: identifying, understanding and assessment of competence in the industrial, educational and psychological practice]. Stuttgart, Shefel-Poeshel Publ., 2007, 796 p.
14. *Tallinnskaya shkola menedzherov* [Tallinn School of managers]. Available at: http://www.tarasov.ru/about/tarasov (accessed: 10.11.2014).
15. Gans D. *Kompetentsii – priobretenie, uchet, instrument* [Competencies – acquisition, inventory, tools]. Munich, Bielefeld Publ., 2007, 140 p.
16. Meskon M., Al'bert M., Khedouri F. *Osnovy menedzhmenta* [Fundamentals of Management]. Moscow, Williams Publ., 2009, 855 p.
17. *Glossarii terminov rynka truda, razrabotki obrazovatel'nykh programm i uchebnykh planov* [Glossary of the labor market, developing educational programs and curricula]. Moscow, Evropeyskiy fond obrazovaniya Publ., 1997, 160 p.
18. Morozova G. B. *Psikhologicheskoe soprovozhdenie organizatsii i personala* [Psychological support of the organization and staff]. St.Petersburg, Rech' Publ., 2006, 400 p.
19. Shadrikov V. D., Druzhinin A. E. *Formirovanie podsistemy professional'no vazhnykh kachestv v protsesse professionalizatsii*. [Formation of the subsystem professionally important qualities in the process of professionalization]. Yaroslavl', Izd-vo Yaroslavskogo un-ta Publ., 1979, 34 p.
20. Kartasheva L.V. *Organizatsionnoe povedenie*. [Organizational Behavior]. Moscow, INFRA-M Publ., 2008, 384 p.

© Подвербных У. С., 2015

УДК 338.45.01

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 1. С. 268–275

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА «ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПО ПРИОРИТЕТНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ НА 2014–2020 ГОДЫ»: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

О. В. Фирулев*, Ю. В. Ерыгин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: Oleg91krasrus@mail.ru.

В настоящее время федеральные целевые программы являются одним из эффективных инструментов финансирования организаций из бюджета Российской Федерации. Дана краткая характеристика Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (ФЦП «ИиР»). В данной программе представлены 6 из 8 приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Проведен анализ активности участия российских организаций в конкурсных отборах на предоставление субсидий из федерального бюджета, проводимых в рамках мероприятий 1.2 и 1.3 ФЦП «ИиР». Выявлено наиболее востребованное мероприятие среди организаций – участников конкурсного отбора. Определены состав организаций – участников по направлениям деятельности, а также организации, подавшие наибольшее количество заявок на участие в конкурсных отборах по лотам мероприятий 1.2 и 1.3 ФЦП «ИиР». С целью оптимизации использования бюджетных средств авторы статьи предлагают дополнить условия формирования конкурсной документации и изменить порядок проведения будущих отборов относительно направлений деятельности организаций – участников конкурсных отборов, что приведет к повышению эффективности реализации ФЦП «ИиР». В частности, предложено предусмотреть возможность льготного кредитования малого бизнеса, увеличить число индустриальных партнеров для снижения финансовой нагрузки, а также перераспределять средства в пользу наиболее востребованных направлений и конкурсных отборов в рамках ФЦП «ИиР».

Ключевые слова: федеральная целевая программа, инновации, инновационная деятельность, ракетно-космическая отрасль.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 268–275

FEDERAL TARGET PROGRAM “RESEARCH AND DEVELOPMENT ON PRIORITY DIRECTIONS OF SCIENTIFIC-TECHNOLOGICAL COMPLEX OF RUSSIA FOR 2014–2020”: THE FIRST RESULTS

O. V. Firulev*, Y. V. Erygin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
*E-mail: Oleg91krasrus@mail.ru

Currently, Federal target programs are one of the effective instruments of funding from the budget of the Russian Federation. In this article there is a brief description of the Federal target program “Research and development on priority directions of development of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020” (hereinafter – the Federal target program “R & D”). This program presents 6 of the 8 priority areas of science, technology and engineering in the Russian Federation. The authors of the article analyzed the active participation of Russian organizations in competitive tenders for the provision of subsidies from the Federal budget held through the activities 1.2 and 1.3 of the Federal target program “R & D”. We have identified the most demanded event among the member organizations in the competitive selection. We also determined the composition of the member organizations by the lines of activity and organizations that submitted the largest number of applications for participation in competitive tenders for lots of activities 1.2 and 1.3 of the Federal target program “R & D”. To optimize the use of budgetary funds, the authors propose to amend conditions of development of the tender documentation and change procedures for future selections regarding the activities of the member organizations of competitive selection that will increase the effectiveness of the implementation of the Federal target program “R & D”. In particular, it is proposed to consider the possibility of preferential lending to small businesses, increase the number of industrial partners to reduce the financial

burden on each industrial partner, and reallocate resources in favour of the most popular areas and competitive selection through the Federal target program "R & D".

Keywords: federal target program, innovations, innovative development, rocket and space industry.

Введение. XXI век уже сейчас можно по праву считать веком инноваций и инновационного развития. Ни одна компания, ни одна корпорация, ни одно государство не может иметь конкурентных преимуществ, не уделяя должного внимания инновационной составляющей.

Так, одной из намеченных государством целей является инновационное развитие ракетно-космической отрасли России, которая могла бы эффективно развиваться на основе интеграции в мировую технологическую среду и разработки передовых промышленных технологий, нацеленных на формирование новых рынков инновационной продукции.

Краткая характеристика Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Анализ современного состояния и перспектив совершенствования форм и методов участия государства в развитии инновационной деятельности на предприятиях ракетно-космической отрасли позволил сделать вывод о том, что федеральные целевые программы являются инструментом эффективного использования бюджетных средств для достижения намеченных целей в определенные сроки на основе оптимизации необходимых ресурсов [1].

Федеральная целевая программа – это сумма мероприятий, процедур и регламентов, через которые государство осуществляет научно-техническую политику, размещая государственные заказы на исследования и разработки в тех направлениях науки и технологий, которые признаны приоритетными [2].

В соответствии с Указом Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 года выделяют 8 приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации:

– безопасность и противодействие терроризму;
– индустрия наносистем;
– информационно-телекоммуникационные системы;
– науки о жизни;
– перспективные виды вооружения, военной и специальной техники;
– рациональное природопользование;
– транспортные и космические системы;
– энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

Шесть направлений из этого перечня, кроме направлений «Безопасность и противодействие терроризму» и «Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники», представлены в Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2013 года № 426.

ФЦП «ИиР» является одним из инструментов предоставления субсидий организациям из федерального бюджета, позволяющих последним проводить исследования в ракетно-космической отрасли. Государственным заказчиком ФЦП «ИиР» является Министерство образования и науки Российской Федерации.

Федеральная целевая программа представляет собой увязанные по ресурсам и срокам осуществления комплексы научно-исследовательских, опытно-конструкторских, производственных, социально-экономических, организационных и других мероприятий, обеспечивающих решение целевых задач в области государственного, экономического и социального развития Российской Федерации. Цель ФЦП «ИиР» – формирование конкурентоспособного и эффективно функционирующего сектора прикладных научных исследований и разработок. Общий объем финансирования ФЦП «ИиР» составляет 239 062,621 млн руб., в том числе средства федерального бюджета – 197 682,426 млн руб., внебюджетные средства – 41 380,195 млн руб. Бюджетные средства будут направлены: на прикладные научные исследования и экспериментальные разработки гражданского назначения – 128 144,166 млн руб., капитальные вложения – 29 193,251 млн руб., прочие нужды – 40 345,009 млн руб. [2].

Программные мероприятия ФЦП «ИиР» структурно группируются в следующие функциональные блоки:

1. Проведение прикладных научных исследований и разработок по приоритетам развития научно-технологической сферы.
2. Международное сотрудничество.
3. Инфраструктура исследований и разработок.
4. Материально-техническая база.
5. Управление реализацией Программы [2].

Анализ активности участия российских организаций в конкурсных отборах на предоставление субсидий из федерального бюджета, проводимых в рамках мероприятий 1.2 и 1.3 ФЦП «ИиР» в 2014 году. В июне 2014 года в рамках мероприятия 1.2 «Проведение прикладных научных исследований для развития отраслей экономики» ФЦП «ИиР» блока «Проведение прикладных научных исследований и разработок по приоритетам развития научно-технологической сферы» завершился конкурсный отбор двухлетних и трехлетних прикладных научных исследований, направленных на создание продукции и технологий, а также в рамках мероприятия 1.3 «Проведение прикладных исследований, направленных на создание опережающего научно-технологического задела для развития отраслей экономики» ФЦП «ИиР» этого же блока завершился конкурсный отбор проектов на выполнение прикладных научных исследований в рамках деятельности технологических платформ по приоритетным направлениям.

На финансирование проектов в рамках данных конкурсов было выделено бюджетных средств на сумму 12,15 млрд руб.

Конкурсной документацией было установлено требование по привлечению внебюджетного софинансирования[1] в определенном объеме от общего объема финансирования работ по проекту, а также установлено требование по привлечению средств индустриального партнера[2] в определенном объеме от суммы внебюджетного софинансирования. Таким образом, для того чтобы заявка была принята к участию в конкурсном отборе, необходимо было решить вопрос софинансирования проекта со стороны организации-участника и индустриального партнера. Кроме того, чтобы заявка имела больший шанс на победу, размер софинансирования должен был быть увеличен относительно минимального допустимого уровня.

Например, если в конкурсной документации установлено требование по привлечению внебюджетного софинансирования в объеме не менее 10 % от общего объема финансирования работ по проекту, а размер запрашиваемой субсидии равен 10 000 000 руб., то сумма внебюджетных средств должна будет равняться минимум 1 111 111,11 руб. Также можно рассчитать долю индустриального партнера во внебюджетном софинансировании: например, если она должна быть не менее 10 %, то она должна составлять минимум 111 111,11 руб.

Данные суммы были рассчитаны по формулам 1 и 2:

$$\text{Вн} \geq \text{Б} \cdot \left[\frac{\text{Вн\%}}{(100\% - \text{Вн\%})} \right], \quad (1)$$

$$\text{Дип} \geq \text{Вн} \cdot \text{Дип\%}, \quad (2)$$

где Вн – внебюджет, руб.; Б – бюджет (субсидия), руб.; Вн% – внебюджет, %; Дип – доля индустриального партнера, руб.; Дип% – доля индустриального партнера, % [2].

Всего было подано 2 311 заявок от 715 организаций Российской Федерации [3–20]. Если же говорить о качестве самих заявок, то все формальные признаки были соблюдены, а количество заявок, не допущенных к участию в конкурсе, исчислялось единицами. Статистика конкурсов по лотам мероприятий 1.2 и 1.3 ФЦП «ИиР» в 2014 году приведена в табл. 1.

Таблица 1

Статистика конкурсов по лотам мероприятий 1.2 и 1.3 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» в 2014 году

Приоритетное направление	Мероприятие							
	1.2 (2 года)		1.2 (3 года)		1.3		Всего	
	Число победителей	Число заявок	Число победителей	Число заявок	Число победителей	Число заявок	Число победителей	Число заявок
Информационно-телекоммуникационные системы	20	87	20	223	20	72	60	382
Рациональное природопользование	20	124	20	294	20	87	60	505
Транспортные и космические системы	20	37	20	135	20	41	60	213
Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика	30	90	30	226	30	81	90	397
Индустрия наносистем	30	105	30	247	30	71	90	423
Науки о жизни	30	85	30	233	30	73	90	391
Итого	150	528	150	1358	150	425	450	2311
Конкурс	3,52		9,05		2,83		5,14	

[1] Под внебюджетными средствами понимаются собственные средства (для бюджетных организаций – средства, полученные от приносящей доход деятельности, расходование которых не противоречит Бюджетному кодексу Российской Федерации, для иных организаций – денежные средства и нефинансовые активы, находящиеся на соответствующих счетах бухгалтерского учета) [2].

[2] Индустриальным партнером является предприятие, в котором ресурсы (оборудование, рабочая сила, технологии, сырье, материалы, энергия, информационные ресурсы) объединяются в производственный процесс, имеющий целью производство продукции или оказание услуг [2].

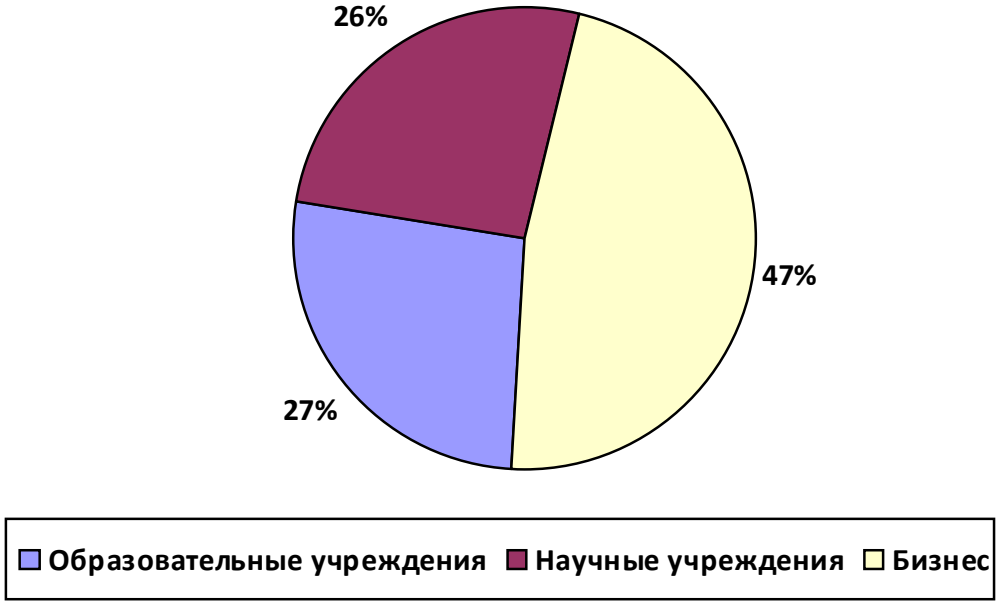
Наиболее востребованным среди организаций-участников стал конкурсный отбор трехлетних прикладных научных исследований, направленных на создание продукции и технологий, в рамках мероприятия 1.2 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». На участие в конкурсе поступило 1358 заявок, в то время как по двум остальным конкурсам среднее значение заявок составило около 500 единиц. Это объясняется тем, что условия конкурсного отбора трехлетних прикладных научных исследований, направленных на создание продукции и технологий, в рамках мероприятия 1.2 ФЦП «ИиР» были наиболее оптимальными. Для организаций-участников важную роль сыграли две составляющие: размер субсидии и сроки реализации проекта.

По первой составляющей максимальный размер субсидии двухлетних прикладных научных исследований по мероприятию 1.2 ФЦП «ИиР» составил 10 млн руб., трехлетних – 26 млн руб., а максимальный размер субсидии на выполнение прикладных научных исследований в рамках деятельности технологических платформ в рамках мероприятия 1.3 составил 45 млн руб. Таким образом, если у организации-участника имеются трудности с привлечением внебюджетных средств, то наиболее подходящим вариантом является первый конкурсный отбор с минимальным финансированием в 10 млн руб. С другой стороны, больший срок реализации проекта был предпочтителен, так как ожидалось сокращение фактических сроков реализации выигранных проектов организаций-участников относительно сроков, заявленных в конкурсной документации. Такое ожидание подтвердилось, и в итоге фактический срок реализации проектов сократился на 6 месяцев и составил 1,5 года по первому конкурсному отбору и 2 года по второму и третьему.

Если обратить внимание на приоритетные направления, то общее количество заявок, поданных по каждому из них, практически одинаковое и в среднем составило 385 единиц. Самый большой конкурс был замечен по направлению «Рациональное природопользование» (8,4 заявки на место), а самый маленький – по направлению «Транспортные и космические системы» (3,55 заявки на место).

Как уже отмечалось ранее, в данных конкурсных отборах приняли участие 715 организаций Российской Федерации, в том числе образовательные учреждения – 191, ООО – 187, научные учреждения – 153, ЗАО – 50, ОАО – 41, федеральные государственные унитарные предприятия – 23, другие – 70. Тот факт, что представителей малого бизнеса в данных конкурсных отборах практически столько же, сколько и представителей образовательных учреждений, говорит об улучшении экономической ситуации в сфере инновационного развития как в ракетно-космической отрасли, так и в России в целом. Экономика нашей страны постепенно приближается к западным стандартам, где приоритеты в инновационной сфере отдаются малому бизнесу. Доля участия организаций по различным направлениям деятельности в трех конкурсных отборах представлена на рисунке.

Однако несмотря на то, что в конкурсном отборе проектов на выполнение прикладных научных исследований представителей бизнес-сообщества практически столько же, сколько представителей образования и науки, количество заявок, поданных от представителей последнего направления, было в разы больше, чем количество заявок, поданных от представителей бизнес-сообщества, поскольку сам по себе бизнес из-за отсутствия необходимых структурных подразделений не способен самостоятельно решать задачи в области прикладных научных исследований. Наибольшее количество заявок на участие в конкурсных отборах было подано от высших учебных заведений (табл. 2).



Направления деятельности организаций – участников конкурсных отборов в рамках мероприятий 1.2 и 1.3 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» в 2014 году

Таблица 2

Организации-участники, подавшие наибольшее количество заявок на участие в конкурсных отборах по лотам мероприятий 1.2 и 1.3 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» в 2014 году

Организация – заявитель	Мероприятие 1.2				Мероприятие 1.3		Всего	
	Подано заявок		Победило заявок		Подано заявок	Победило заявок	Подано заявок	Победило заявок
	2 года	3 года	2 года	3 года				
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»	19	46	5	7	10	6	75	18
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МИЭТ»	12	16	3	3	13	6	41	12
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»	7	20	1	2	12	5	39	8
ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет»	7	20	0	3	8	1	35	4
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»	8	20	2	3	7	2	35	7
ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»	8	20	3	7	4	2	32	12
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»	8	18	5	3	5	1	31	9
ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»	4	20	1	4	3	1	27	6
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»	7	13	2	1	7	2	27	5
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»	5	11	2	1	10	4	26	7

Заключение. Таким образом, несмотря на то, что в данный момент невозможно говорить о достижении или недостижении целевых индикаторов и показателей программы в 2014 году, по данным проведенного анализа уже сейчас можно с уверенностью сказать, что ФЦП «ИиР» является востребованным инструментом финансирования инновационных проектов. В данной программе активно принимают участие представители таких направлений, как образование, наука и бизнес.

Кроме того, для повышения эффекта от реализации данной программы авторами предлагается дополнить условия формирования конкурсной документации и изменить порядок проведения будущих отборов относительно направлений деятельности организаций-участников. В частности:

1. Предусмотреть возможность льготного кредитования малого бизнеса для обеспечения софинансирования инновационных проектов в рамках ФЦП «ИиР».

2. Увеличить число индустриальных партнеров для снижения финансовой нагрузки на каждого индустриального партнера и обеспечения более быстрого распространения инноваций.

3. Оценить эффективность проектов-победителей в рамках наиболее востребованных направлений и, в случае положительного результата, увеличить финансирование востребованных направлений за счет менее востребованных, тем самым повысив уровень конкуренции среди последних.

4. Аналогично поступить в отношении наиболее и наименее востребованных конкурсных отборов в рамках ФЦП «ИиР».

Библиографические ссылки

1. Фирулев О. В., Ерыгин Ю. В. Современное состояние и перспективы совершенствования форм и методов участия государства в развитии инновационной деятельности на предприятиях ракетно-космической отрасли // Вестник СибГАУ. 2014. № 2 (54). С. 179–182.

2. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» [Электронный ресурс]. URL: http://2014.fcpir.ru (дата обращения: 28.08.2014).

3. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 08.05.2014 г. № 2014-14-576-0058-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/82d/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

4. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 12.05.2014 г. № 2014-14-576-0056-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/9e2/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

5. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 08.05.2014 г. № 2014-14-576-0054-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/dce/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

6. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 12.05.2014 г. № 2014-14-576-0052-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/234/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

7. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 08.05.2014 г. № 2014-14-576-0050-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/810/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

8. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 12.05.2014 г. № 2014-14-576-0048-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/703/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

9. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 14.05.2014 г. № 2014-14-576-0057-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/f77/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

10. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 16.05.2014 г. № 2014-14-576-0055-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/fdd/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

11. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 14.05.2014 г. № 2014-14-576-0053-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/512/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

12. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 16.05.2014 г. № 2014-14-576-0051-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/771/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

13. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 14.05.2014 г. № 2014-14-576-0049-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/8ac/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

14. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 16.05.2014 г. № 2014-14-576-0047-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/d2c/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

15. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 06.05.2014 г. № 2014-14-579-0001-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/5bf/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

16. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 07.05.2014 г. № 2014-14-579-0002-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/b08/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

17. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 06.05.2014 г. № 2014-14-579-0003-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/1dd/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

18. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 07.05.2014 г. № 2014-14-579-0004-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/946/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

19. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 06.05.2014 г. № 2014-14-579-0005-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/496/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

20. Протокол Министерства образования и науки Российской Федерации от 07.05.2014 г. № 2014-14-579-0006-3 оценки заявок на участие в конкурсном отборе на предоставление субсидий из федерального бюджета [Электронный ресурс]. URL: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/e7c/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (дата обращения: 30.06.2014).

References

1. Firulev O. V., Erygin Y. V. [The modern state and perspectives for improving the forms and methods of state participation in the development of innovative activity in the rocket and space industry]. *Vestnik SibGAU.* 2014, no. 2 (54), p. 179–182 (In Russ.).

2. *Federal'naja tselevaja programma "Issledovanija i razrabotki po prioritetnym napravlenijam razvitija nauchno-tekhnologicheskogo kompleksa Rossii na 2014–2020 gody"* [Federal target program "Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020"]. Available at: http://2014.fcpir.ru (accessed 28 August 2014).

3. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 08.05.2014 g. № 2014-14-576-0058-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 08.05.2014, contract number 2014-14-576-0058-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/82d/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

4. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 12.05.2014 g. № 2014-14-576-0056-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 12.05.2014, contract number 2014-14-576-0056-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/9e2/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

5. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 08.05.2014 g. № 2014-14-576-0054-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 08.05.2014, contract number 2014-14-576-0054-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/dce/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

6. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 12.05.2014 g. № 2014-14-576-0052-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 12.05.2014, contract number 2014-14-576-0052-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/234/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

7. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 08.05.2014 g. № 2014-14-576-0050-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 08.05.2014, contract number 2014-14-576-0050-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/810/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

8. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 12.05.2014 g. № 2014-14-576-0048-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 12.05.2014, contract number 2014-14-576-0048-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/703/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

9. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 14.05.2014 g. № 2014-14-576-0057-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 14.05.2014, contract number 2014-14-576-0057-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/f77/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

10. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 16.05.2014 g. № 2014-14-576-0055-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 16.05.2014, contract number 2014-14-576-0055-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/fdd/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

11. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 14.05.2014 g. № 2014-14-576-0053-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 14.05.2014, contract number 2014-14-576-0053-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/512/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

12. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 16.05.2014 g. № 2014-14-576-0051-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 16.05.2014, contract number 2014-14-576-0051-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/771/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

13. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 14.05.2014 g. № 2014-14-576-0049-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 14.05.2014, contract number 2014-14-576-0049-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/8ac/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

14. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 16.05.2014 g. № 2014-14-576-0047-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 16.05.2014, contract number 2014-14-576-0047-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/d2c/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

15. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 06.05.2014 g. № 2014-14-579-0001-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 06.05.2014, contract number 2014-14-579-0001-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/5bf/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

16. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 07.05.2014 g. № 2014-14-579-0002-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 07.05.2014, contract number 2014-14-579-0002-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/b08/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

17. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 06.05.2014 g. № 2014-14-579-0003-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 06.05.2014, contract number 2014-14-579-0003-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/1dd/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

18. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 07.05.2014 g. № 2014-14-579-0004-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 07.05.2014, contract number 2014-14-579-0004-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/946/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

19. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 06.05.2014 g. № 2014-14-579-0005-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 06.05.2014, contract number 2014-14-579-0005-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/496/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

20. *Protokol Ministerstva obrazovanija i nauki Rossijskoj Federatsii ot 07.05.2014 g. № 2014-14-579-0006-3 otsenki zajavok na uchastie v konkursnom otbore na predostavlenie subsidij iz federal'nogo bjudzheta* [The Protocol of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, dated 07.05.2014, contract number 2014-14-579-0006-3, for assessment of applications for request for tender of Federal subsidies provision]. Available at: http://www.fcpir.ru/upload/iblock/e7c/protokol-otsenki-i-sopostavleniya.pdf (accessed: 30 June 2014).

© Фирулев О. В., Ерыгин Ю. В., 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антамошкин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: oleslav@mail.ru.

Апасов Владимир Иванович – аспирант кафедры промышленной электроники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; инженер-конструктор, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: vovaap@mail.ru.

Аристов Анатолий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и электрооборудования, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: parist@sibmail.com.

Ахмедова Шахназ Агасувар кызы – магистр техники и технологий, младший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shahnaz@inbox.ru.

Балакчина Екатерина Сергеевна – магистр техники и технологии, инженер лаборатории контроля производства, ОАО «Германий». E-mail: gelkp@mail.ru.

Баландин Евгений Александрович − инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: error.balandina@yandex.ru.

Баландина Татьяна Николаевна − инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: error.balandina@yandex.ru.

Бондаренко Галина Николаевна – старший научный сотрудник, Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук.

Бревнов Василий Григорьевич – аспирант кафедры менеджмента, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Vasiliy.brevnov@mail.ru.

Брестер Кристина Юрьевна – младший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: christina.bre@yandex.ru.

Брильков Анатолий Васильевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой современного естествознания, Сибирский федеральный университет. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru.

Вавилов Денис Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет. E-mail: vavilov@krasec.com.

Васенина Алена Андреевна – научный сотрудник – заместитель заведующего научно-исследовательской лабораторией, ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (ОАО «ОНИИП»). E-mail: vas.al.an@rambler.ru.

Васильцов Александр Александрович – инженер-конструктор I категории, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: ennui_ne@mail.ru.

Гасанова Татьяна Олеговна – магистр прикладной математики и информатики, аспирант кафедры диалоговых систем, Институт телекоммуникационных технологий, Ульмский университет, Германия. E-mail: tatiana.gasanova@uni-ulm.de.

Деев Прохор Олегович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: prokhor777@gmail.com.

Додорин Иван Сергеевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; инженер 1-й категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: ivans@iss-reshetnev.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор, первый проректор – проректор по образовательной деятельности, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Erygin@sibsau.ru.

Ерыгина Лилия Викторовна – доктор экономических наук, профессор, декан инженерно-экономического факультета, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: erigina@sibsau.ru.

Жигалов Виктор Степанович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры технической физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru.

Жнидаршич Аня – доцент, доцент Института организационных наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: anja.znidarsic@fov.uni-mb.si.

Игнатовский Виталий Владимирович – инженер-электроник III категории, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: sacrament90@gmail.com.

Коблов Николай Николаевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО «Научно-производственный центр «Полюс»; ассистент кафедры точного приборостроения, Институт неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: polus@online.tomsk.net.

Константинов Михаил Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: mkonst@bk.ru.

Коплярова Надежда Владимировна – ассистент кафедры информационных систем, Институт информационных и космических технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: koplyarovanv@mail.ru.

Копыткова Светлана Алексеевна – начальник лаборатории контроля производства, ОАО «Германий». E-mail: gelkp@mail.ru.

Корнеева Анна Анатольевна – старший преподаватель, Сибирский федеральный университет. E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru.

Корнет Мария Евгеньевна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: maria4business@mail.ru.

Коромыслова Александра Андреевна – магистрант кафедры системного анализа, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: akoromyslova@mail.ru.

Космынина Наталья Александровна – инженер-программист, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: n.kosmynina@list.ru.

Кофьяч Даворин – доцент, доцент Института организационных наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: davorin.kofjac@fov.uni-mb.si.

Кравцова Елена Дагриевна – кандидат технических наук, доцент кафедры композиционных материалов и физикохимии металлургических процессов, Сибирский федеральный университет. E-mail: dagrievna@mail.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кузнецов Петр Анатольевич – ассистент, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: forubox@yandex.ru.

Курносов Антон Сергеевич – аспирант, Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет. E-mail: kurnosov89@gmail.com.

Латышенок Дмитрий Константинович – аспирант, Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: Dukenukem2000@mail.ru.

Липовцев Анатолий Анатольевич – инженер-конструктор I категории, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: polus@online.tomsk.net.

Логинов Юрий Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: loginov@sibsau.ru.

Лопатин Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерного моделирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: lopatin@krasmail.ru.

Лукин Роман Сергеевич – старший преподаватель кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет. E-mail: rlukin88@yandex.ru.

Малетич Матьяж – доцент, доцент Института организационных наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: matjaz.maletic@fov.uni-mb.si.

Малышенко Александр Максимович – доктр технических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: mam@tpu.ru.

Масич Игорь Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: i-masich@yandex.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем, Институт информационных и космических технологий, Сибирский федеральный университет.

Минкер Вольфганг – дважды доктор-инженер, профессор и ассоциированный директор Института техники связи, Ульмский университет, Германия. E-mail: wolfgang.minker@uni-ulm.de.

Михайлов Максим Валентинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Научно-производственный центр «Полюс»; доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: maxmir2004@mail.ru.

Михальченко Сергей Геннадьевич – доктор технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. E-mail: msg@ie.tusur.ru.

Мозжерин Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры современного естествознания, Сибирский федеральный университет; младший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru.

Мошняков Антон Алексеевич – инженер-конструктор 2-й категории, АО «Научно-производственный центр «Полюс»; аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: moshnyakovaa@tpu.ru.

Мягков Виктор Григорьевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук.

Нагорный Василий Олегович – инженер-конструктор I категории, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: gryzun@rbcmail.ru

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Платов Илья Вячеславович – кандидат технических наук, инженер-конструктор, Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина. E-mail: aia@laspace.ru.

Подвербных Ульяна Сергеевна – аспирант кафедры международного кадрового и проектного управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: verba07.90@mail.ru.

Подкопаев Олег Иванович – кандидат технических наук, генеральный директор, ОАО «Германий».

Потылицына Елена Николаевна – ассистент кафедры инженерной экологии, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Leonova_en@mail.ru.

Резанова Мария Владимировна – аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ambrella-7@mail.ru.

Рогалев Александр Алексеевич – аспирант, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: ran@akadem.ru.

Рогалев Алексей Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: rogalyov@icm.krasn.ru.

Розман Чртомир – профессор, профессор, факультет агрокультуры и биологических наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: crt.rozman@um.si.

Рыбакова Александра Николаевна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sashely2008@rambler.ru.

Семенкин Евгений Станиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru.

Семенкина Мария Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: semenkina88@mail.ru.

Семенкина Ольга Эрнестовна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: semenkina.olga@mail.ru.

Сергеева Наталья Александровна – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: sergena@list.ru.

Сергиенко Роман Борисович – кандидат технических наук, старший исследователь научной группы «Диалоговые системы», Институт телекоммуникационных технологий, Ульмский университет, Германия. E-mail: roman.sergienko@uni-ulm.de.

Сидоренко Клим Андреевич – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией, ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (ОАО «ОНИИП»). E-mail: sidorenko.klim@yandex.ru.

Сидоров Максим Юрьевич – научный сотрудник, Ульмский университет, Германия. E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de.

Симонов Александр Владимирович – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина. E-mail: alex.simonov@laspace.ru.

Смирнов Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: smirnov@sibsau.ru.

Сопов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Становов Владимир Вадимович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Сугак Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной экологии, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sugak@mail.ru.

Турпанов Игорь Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук.

Удалов Дмитрий Владимирович – аспирант, ведущий инженер-конструктор, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: mr.udv@mail.ru.

Усаков Владимир Иосифович – доктор технических наук, профессор; главный инженер, ОАО «ЦКБ «Геофизика». E-mail: adm@geockb.ru.

Фатеев Юрий Леонидович – доктор технических наук, профессор военной кафедры, Военно-инженерный институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: fateev_yury@inbox.ru.

Филонова Светлана Юрьевна – начальник сектора, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: tomsk042012@gmail.com.

Фирулев Олег Владимирович – аспирант кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Oleg91krasrus@mail.ru.

Хан Арслан Эхсан – магистрант, Ульмский университет, Германия. E-mail: arslan.khan@uni-ulm.de.

Хритоненко Дмитрий Иванович – магистр техники и технологий, аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: hdmitry.91@mail.ru.

Черватюк Василий Демьянович – ведущий инженер-программист, АО «Научно-производственный центр «Полюс»; аспирант кафедры точного приборостроения, Институт неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: polus@online.tomsk.net.

Чжан Екатерина Анатольевна – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: ekach@list.ru.

Чимитова Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программных систем и баз данных, Новосибирский государственный технический университет. E-mail: chimitova@corp.nstu.ru.

Шан Ур Реман Мухаммед – магистрант, Ульмский университет, Германия. E-mail: muhammad.shan@uni-ulm.de.

Шиманский Александр Федорович – доктор химических наук, профессор кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shimanaf@mail.ru.

Шкраба Андрей – доцент, доцент Института организационных наук, Мариборский университет, Словения. E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si.

Щербаков Сергей Алексеевич – инженер-конструктор II категории, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: deathroll@scalpnet.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhmedova Shakhnaz Agasuvar kyzy – Master's Degree student, junior research fellow, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: shahnaz@inbox.ru.

Antamoshkin Alexander Nikolaevich – Dr. Sc., professor, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: oleslav@mail.ru.

Apasov Vladimir Ivanovich – postgraduate student of Industrial electronics department, engineer-designer of SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". E-mail: vovaap@mail.ru.

Aristov Anatoly Vladimirovich – Dr. Sc., professor, Department of electric drive and electric equipment, National research Tomsk Polytechnic University. Email: parist@sibmail.com.

Balakchina Ekaterina Sergeevna – Master's Degree student of engineering and technology, engineer of the laboratory JSC "Germanii". E-mail: gelkp@mail.ru.

Balandin Evgeniy Aleksandrovich – engineer, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: error.balandina@yandex.ru.

Balandina Tat'yana Nikolaevna – engineer, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: error.balandina@yandex.ru.

Bondarenko Galina Nikolaevna – senior research fellow, Institute of chemistry and chemical technology, SB RAS.

Brester Christina Yurievna – junior research fellow, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: christina.bre@yandex.ru.

Brevnov Vasily Grigoryevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: vasiliy.brevnov@mail.ru.

Brilikov Anatoly Vasil'evich – Dr. Sc., professor, Head of Department of Modern Natural Science, Siberian Federal University. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru.

Chervatyuk Vasiliy Demjanovich – engineer-programmer, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus"; postgraduate student of Precision instrument making department, Institute of Non-Destructive Testing, National research Tomsk Polytechnic University. E-mail: polus@online.tomsk.net.

Chimitova Ekaterina Vladimirovna – Cand. Sc., Docent, Software Systems and Databases Department, Novosibirsk State Technical University. E-mail: chimitova@corp.nstu.ru.

Chzhan Ekaterina Anatol'evna – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: ekach@list.ru.

Deev Prokhor Olegovich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: prokhor777@gmail.com.

Dodorin Ivan Sergeevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, engineer 1st category of JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: ivans@iss-reshetnev.ru.

Erygin Yuri Vladimirovich – Dr. Sc., professor, First vice-rector, vice-rector for academic affairs of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Erygin@sibsau.ru.

Erygina Lilia Viktorovna – Dr. Sc., professor, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: erigina@sibsau.ru.

Fateev Yuri Leonidovich – Dr. Sc., professor of Military department, Military Engineering Institute, Siberian Federal University. E-mail: fateev_yury@inbox.ru.

Filonova Svetlana Yur'evna – head of section, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". E-mail: tomsk042012@gmail.com.

Firulev Oleg Vladimirovich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: oleg91krasrus@mail.ru.

Gasanova Tatyana Olegovna – Master's Degree student of applied mathematics and informatics, University of Ulm. E-mail: tatiana.gasanova@uni-ulm.de.

Ignatovskiy Vitaly Vladimirovich – electronics engineer (3rd cat.), SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". E-mail: sacrament90@gmail.com.

Khan Arslan Ehsan – Master's Degree student of communications technologies, University of Ulm. E-mail: arslan.khan@uni-ulm.de.

Khritonenko Dmitrii Ivanovich – Master's Degree student of engineering and technology, postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: hdmitry.91@mail.ru.

Kofjač Davorin – Docent, Faculty of Organizational Sciences, University of Maribor. E-mail: davorin.kofjac@fov.uni-mb.si.

Koblov Nikolay Nikolaevich – Cand. Sc., head of the laboratory, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus"; assistant of Precision instrument making department, Institute of Non-Destructive Testing, National research Tomsk Polytechnic University. E-mail: polus@online.tomsk.net.

Konstantinov Mikhail Sergeevich – Dr. Sc., Moscow Aviation Institute. E-mail: mkonst@bk.ru.

Koplyarova Nadezhda Vladimirovna – assistant, Department of Information Systems, Institute of Information and Space Technologies, Siberian Federal University. E-mail: koplyarovanv@mail.ru.

Korneeva Anna Anatol'eva – senior lecture, Siberian Federal University. E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru.

Kornet Maria Evgenjevna – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: maria4business@mail.ru.

Koromyslova Aleksandra Andreevna – Master's Degree student, System Analysis and Operations Research Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: akoromyslova@mail.ru.

Kosmynina Natalia Alexandrovna – engineer-programmer, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: n.kosmynina@list.ru.

Kopytkova Svetlana Alekseevna – Head of Laboratory of production control, JSC "Germanii". E-mail: gelkp@mail.ru.

Kravtsova Elena Dagrievna – Cand. Sc., Docent of Department of Composite materials and physical chemistry of metallurgical processes, Siberian Federal University. E-mail: dagrievna@mail.ru.

Krushenko Genrikh Gavrilovich – Dr. Sc., professor, senior research fellow, Institute of Computational Modeling, SB RAS. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kurnosov Anton Sergeevich – postgraduate student, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University. E-mail: kurnosov89@gmail.com.

Kuznetsov Petr Anatol'evich – assistant, Siberian State Technological University. E-mail: forubox@yandex.ru.

Latyshenok Dmitriy Konstantinovich – postgraduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University. E-mail: Dukenukem2000@mail.ru.

Lipovtsev Anatoliy Anatol'evich – 1st design engineer, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". E-mail: polus@online.tomsk.net.

Loginov Yuriy Yur'evich – Dr. Sc., Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: loginov@sibsau.ru.

Lopatin Aleksander Vitalyevich – Dr. Sc., professor, head of Computer modeling department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: lopatin@krasmail.ru.

Lukin Roman Sergeevich – senior teacher, Department of Design and technology support of engineering production, Siberian Federal University. E-mail: rlukin88@yandex.ru.

Maletič Matjaz – Docent, Faculty of Organizational Sciences, University of Maribor. E-mail: matjaz.maletic@fov.uni-mb.si.

Malyshenko Alexander Maksimovic – Dr. Sc., professor of National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: mam@tpu.ru.

Masich Igor Sergeevich – Cand. Sc., Docent, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: i-masich@yandex.ru.

Medvedev Aleksandr Vasil'evich – Dr. Sc., Professor, Department of Information Systems, Institute of Information and Space Technologies, Siberian Federal University.

Mikhaylov Maksim Valentinovich – Cand. Sc., senior research fellow, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus"; Docent, National research Tomsk Polytechnic University. E-mail: maxmir2004@mail.ru.

Mikhalchenko Sergey Gennadevich – Dr. Sc., senior lecturer of Industrial electronics department, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. E-mail: msg@ie.tusur.ru.

Minker Wolfgang – twice Dr. Sc., professor and associative director of the Institute of communication technique, University of Ulm. E-mail: wolfgang.minker@uni-ulm.de.

Moshnyakov Anton Alekseevich – design engineer (2nd cat.), SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus"; postgraduate student, National research Tomsk Polytechnic University. E-mail: moshnyakovaa@tpu.ru.

Mozherin Alexander Vladimirovich – Cand. Sc., senior teacher, Department of Modern Natural Science, Siberian Federal University; junior research fellow, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: amozzherin@sfu-kras.ru.

Myagkov Victor Grigorievich – Dr. Sc., senior research fellow; Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch, SB RAS.

Nagorniy Vasiliy Olegovich – first rank design engineer, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". Email: gryzun@rbcmail.ru.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Cand. Sc., professor, head of Flying machines department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Platov Ilya Vyacheslavovich – Cand. Sc., engineer-designer, Research and manufacturing association named after S. A. Lavochkin. E-mail: aia@laspace.ru.

Podkopaev Oleg Ivanovich – Cand. Sc., CEO of JSC "Germanii".

Podverbnikh Ulyana Sergeevna – postgraduate student of Department of international personnel and project management, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: verba07.90@mail.ru.

Potilitsina Elena Nikolaevna – assistant of Environmental Engineering Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Leonova_en@mail.ru.

Rezanova Mariya Vladimirovna – postgraduate student of Flying machines department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: ambrella-7@mail.ru.

Rogalyov Alexey Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, senior researcher, Institute of Computational Modeling, SB RAS. E-mail: rogalyov@icm.krasn.ru.

Rogalyov Alexander Alexeevich – postgraduate student, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: ran@akadem.ru.

Rozman Črtomir – Professor, Faculty of Agriculture and Life Sciences, University of Maribor**.** E-mail: crt.rozman@um.si.

Rybakova Alexandra Nikolaevna – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sashely2008@rambler.ru.

Shcherbakov Sergey Alexeevich – electronic design engineer (2nd cat.), SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". E-mail: deathroll@scalpnet.ru.

Semenkin Eugene Stanislavovich – Dr. Sc., professor of System Analysis and Operations Research Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru.

Semenkina Maria Evgen'evna – Cand. Sc., Docent, Department of the Higher Mathematics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: semenkina88@mail.ru.

Semenkina Olga Ernestovna – Dr. Sc., professor, professor of the Higher Mathematics Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: semenkina.olga@mail.ru.

Sergeeva Natalia Alexandrovna – Cand. Sc., Docent, Department of Informatics, Institution of Space and Information technologies, Siberian Federal University. E-mail: sergena@list.ru.

Sergienko Roman Borisovich – Cand. Sc., senior researcher of the research group of dialogue systems of the Institute of Communications Engineering, University of Ulm. E-mail: roman.sergienko@uni-ulm.de.

Shan Ur Rehman Muhammad – Master's Degree student, University of Ulm. E-mail: muhammad.shan@uni-ulm.de.

Shimanskiy Alexander Fedorovich – Dr. Sc., professor of Quality management and certification department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: shimanaf@mail.ru.

Sidorenko Klim Andreevich – Cand. Sc., head of the research laboratory, JSC "Omskiy Nauchno Issledovatelskiy Institut Priborostroeniya". E-mail: sidorenko.klim@yandex.ru.

Sidorov Maxim Yurievich – research fellow, University of Ulm. E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de.

Simonov Alexander Vladimorovich – Cand. Sc., deputy head of department, Research and manufacturing association named after S. A. Lavochkin. E-mail: alex.simonov@laspace.ru.

Škraba Andrey – Docent, Faculty of Organizational Sciences, University of Maribor. E-mail: andrej.skraba@fov.uni-mb.si.

Smirnov Nikolai Anatol'evich – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Technical Mechanics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: smirnov@sibsau.ru.

Sopov Evgenii Alexandrovich – Cand. Sc., Docent, Docent of System Analysis and Operations Research Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Stanovov Vladimir Vadimovich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Sugak Evgeny Viktorovich – Dr. Sc., Professor, Professor of Environmental Engineering Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sugak@mail.ru.

Turpanov Igor Alexandrovich – Cand. Sc., senior research fellow, Kirensky Institute of Physics, SB RAS.

Udalov Dmitry Vladimirovich – postgraduate student, senior design engineer, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". E-mail: mr.udv@mail.ru.

Usakov Vladimir Iosifovich – Dr. Sc., professor, Chief Engineer of "CDB "Geophysics". E-mail: adm@geockb.ru.

Vasenina Alena Andreevna – research scientist, deputy head of the research laboratory, JSC "Omskiy Nauchno Issledovatelskiy Institut Priborostroeniya". E-mail: vas.al.an@rambler.ru.

Vasiltsov Aleksander Aleksandrovich – 1st category design engineer, SC "Scientific&Industrial Centre "Polyus". E-mail:ennui_ne@mail.ru.

Vavilov Denis Vladimirovich – Cand. Sc., Docent of Department of Design and technology support of engineering production, Siberian Federal University. E-mail: vavilov@krasec.com.

Zhigalov Victor Stepanovich – Dr. Sc., senior research fellow, professor, Department of Technical physics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev; Kirensky Institute of Physics, SB RAS. E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru.

Žnidaršič Anja – Docent, Faculty of Organizational Sciences, University of Maribor. E-mail: anja.znidarsic@fov.uni-mb.si.