ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 3(55)

Красноярск 2014

ВЕСТНИК

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

Выпуск 3(55)

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, 2014

VESTNIK

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

Issue 3(55)

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, 2014

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 «Почта России» – 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 – Pochta Rossii
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 SibGAU 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 19.09.2014. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 31,4.
Уч.-изд. л. 40,0. Тираж 1000 экз. Заказ 87/213. С 178/14.
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): 19.09.2014. Format 70×108/16.
Offset Paper. Print flat. 31,4. Published sheets 40,2.
1000 copies. Order 87/213. C 178/14.
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

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Акланов Ф. А., Ковалев Д. И., Туева Е. В, Зеленков П. В., Першакова К. К. Модельно-алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений в информационных системах управления 10

Ахмедова Ш. А., Вишневская С. Р., Коромыслова А. А. Интеллектуальные информационные технологии для прогнозирования успешности учебной деятельности абитуриентов 16

Бакин А. М., Трифанов И. В., Оборина Л. И., Исмаилов Б. Н. Моделирование рупорной решетки на основе учета распределения поля в плоскости раскрыва рупора 21

Банникова А. В., Корнеева А. А., Корнет М. Е., Сергеева Н. А. О непараметрическом управлении стохастическим объектом с памятью 28

Брестер К. Ю., Вишневская С. Р., Семенкина О. Э. Распознавание психоэмоционального состояния дистанционного студента по устной речи адаптивными интеллектуальными информационными технологиями 35

Бычков С. С., Попов А. М., Золотарев В. В. Повышение уровня надежности информационных систем 42

Вайнштейн И. И., Федотова И. М. Задача Гольдштика о склейке вихревых течений идеальной жидкости в осесимметрическом случае 48

Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Моделирование и оптимизация технологических систем с распределенными параметрами 55

Карпенко Е. В., Колбасина Н. А., Морозов Д. И. Проведение структурного анализа активной части торцевого генератора в среде ANSYS 63

Качалин С. В. Оценка устойчивости алгоритмов обучения больших искусственных нейронных сетей биометрических приложений 68

Киреев В. А. Метод коллокации с бикубическим эрмитовым базисом в области с криволинейной границей 73

Ковалев И. В. Анализ проблем в области исследования надежности программного обеспечения: многоэтапность и архитектурный аспект 78

Коплярова Н. В., Сергеева Н. А. Непараметрические модели динамических объектов класса Гаммерштейна 93

Краснобаев Ю. В., Захаров В. В., Карнаухов М. А. Анализ электромагнитных процессов в повышающе-понижающем преобразователе с возможностью реверса потока энергии и повышенным коэффициентом полезного действия 100

Медведев А. В., Михов Е. Д. О компьютерном исследовании *H*-моделей 107

Пономарев С. И., Ереско С. П., Ереско Т. Т. Совершенствование технологии изготовления узлов аэрокосмического производства 114

Проскурин А. В. Автоматическое аннотирование ландшафтных изображений 120

Рогозина М. С. Разрешимость разностной задачи Коши для многослойных неявных разностных схем 126

Сабиров Р. А. Особенности дифференциальной и вариационно-разностной формулировок задачи продольно-поперечного изгиба стержня от сил инерции 131

Семенкина М. Е., Семенкин Е. С., Рыжиков И. С. Прогнозирование динамики электрических характеристик солнечных батарей космических аппаратов методами вычислительного интеллекта 139

Серикова Н. И., Иванов А. И., Качалин С. В. Биометрическая статистика: «сглаживание» гистограмм, построенных на малой обучающей выборке 146

Тушко Т. А. Расчет годографа Тывы на основе скоростной модели среды 151

Фарков М. А., Легалов А. И. Улучшение реализации метода дифференциальной эволюции на графических процессорах 157

Чудновский М. М. Алгоритм распознавания жестов руки человека на видеопоследовательности в режиме реального времени для реализации интерфейсов человеко-машинного взаимодействия 162

Шендель А. С., Веселков С. А., Лапухин Е. Г. Две новые затменно-переменные звезды в созвездии Цефея 168

Яковлев Е. И. Об аналитическом продолжении кратного степенного ряда с помощью одномерных матричных методов суммирования 172

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Крушенко Г. Г., Голованова В. В. Балансировка некоторых агрегатов космических аппаратов 178
Крушенко Г. Г., Голованова В. В. Совершенствование системы терморегулирования космических аппаратов 185

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Аплеснин С. С., Остапенко А. А., Кретинин В. В., Панасевич А. М., Галяс А. И., Янушкевич К. И. Диэлектрические свойства тонких пленок $Bi_{1-x}La_xFeO_3$ 192
Докшанин С. Г. Влияние смазочных композиций с ультрадисперсными добавками на фреттинг-усталостные процессы 198
Крушенко Г. Г. Совершенствование технологии приготовления сплава системы Al-Mg, применяемого в конструкциях летательных аппаратов 202
Музалевский К. В., Миронов В. Л. Измерение толщины слоя нефтенасыщенной среды с применением наносекундного электромагнитного импульсного зонда 210
Музалевский К. В., Миронов В. Л., Михайлов М. И. Потенциальная дальность зондирования границ нефтенасыщенного пласта широкополосным электромагнитным импульсным зондом 217
Трушников Д. Н., Колева Е., Младенов Г., Щербаков А. В. Управление формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке с осцилляцией пучка 224

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Ерыгина Л. В., Макаренко Н. О. Концептуальный подход к определению стратегических альтернатив развития предприятий ракетно-космической промышленности 232
Кукушкин С. Г., Подвербных У. С., Самохвалова С. М. Формирование инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов предприятия ракетно-космического комплекса 239
Носачевская Е. А., Климук В. В. О научном обосновании оценки уровня эффективности использования региональных ресурсов 245
Попова Т. С. Структурные сдвиги в современных наукоемких конкурентоспособных ракетно-космических технологических направлениях экономической системы России 250

Сведения об авторах 259

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Aklanov F. A., Kovalev D. I., Tueva E. V., Zelenkov P. V., Pershakova K. K. Model-algorithmic software decision support in information systems management 10
Akhmedova Sh. A., Vishnevskaya S. R., Koromyslova A. A. Data mining tools for prospective students' success rate prediction 16
Bakin A. M., Trifanov I. V., Oborina L. I., Ismailov B. N. Modeling of a horn-based lattice based on field distribution in the plane of aperture of the horn 21
Bannikova A. V., Korneeva A. A., Kornet M. E., Sergeeva N. A. About nonparametric control of object with memory 28
Brester K. Yu., Vishnevskaya S. R., Semenkina O. E. Speech-based emotion recognition of the distant student with adaptive intellectual information technologies 35
Bychkov S. S., Popov A. M., Zolotarev V. V. Increase of reliability level of information systems 42
Vainshtein I. I., Fedotova I. M. Goldshtik's problem of pasting of vortical currents of an ideal liquid in the axially symmetric case 48
Demidenko N. D., Kulagina L. V. Simulation and optimisation in technological systems with distributed parametres 55
Karpenko E. V., Kolbasina N. A., Morozov D. I. Structural analysis in ANSYS of the axial flux permanent magnet generator 63
Kachalin S. V. Assessment of stability learning algorithms large artificial neural networks of biometric application 68
Kireev V. A. Hermite bicubic collocation method in domain with curvilinear boundary 73
Kovalev I. V. Analysis of problems in the research area of software reliability: a lot of stages and architectural aspect 78
Koplyarova N. V., Sergeeva N. A. Nonparametric models of the Hammerstein dynamical objects 93
Krasnobaev Y. V., Zakharov V. V., Karnaukhov M. A. Analysis of electromagnetic processes in ac-dc converters with possibility of reverse flow of energy and increased efficiency 100
Medvedev A. V., Mihov E. D. About computer research of H models 107
Ponomarev S. I., Eresko S. P., Eresko T. T. The improvement of technology manufacturing units of aerospace industry 114
Proskurin A. V. Automatic landscape image annotation 120
Rogozina M. S. Solvability of a difference cauchy problem for multi-layer implicit difference schemes 126
Sabirov R. A. Features of differential and variational-differential formulations of the problem of the longitudinally cross bend of the core from inertia forces 131
Semenkina M. E., Semenkin E. S., Ryzhikov I. S. Dynamics forecasting for electrical characteristics of spacecraft solar arrays by means of computational intelligence 139
Serikova N. I., Ivanov A. I., Kachalin S. V. Biometric stats: smoothing histograms based on small training sample 146
Tushko T. A. Calculation of the hodograph for Tiva region on the basis of velocity model of media 151
Farkov M. A., Legalov A. I. An improvement of the differential evolution method implementated on GPU 157
Chudnovsky M. M. A real-time algorithm for human's hand gesture recognition on video-sequence for human-computer interaction interfaces 162
Shendel A. S., Veselkov S. A., Lapukhin E. G. Two new eclipsing systems in Cepheus constellation 168
Yakovlev E. I. About analytical resuming multiple power series by using one-dimensional matrix methods of summation 172

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Krushenko G. G., Golovanova V. V. Some units spacecraft balancing 178
Krushenko G. G., Golovanova V. V. Perfection of control systems of space vehicles 185

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Aplesnin S. S., Ostapenko A. A., Kretinin V. V., Panasevich A. M., Galyas A. I., Yanushkevic K. I. Dielectric properties of $Bi_{1-x}La_xFeO_3$ thin films 192
Dokshanin S. G. Effect of lubricating composition with ultra-dispersive additives on fretting fatigue process 198
Krushenko G. G. Improving the technology of preparation of the Al-Mg system alloy used in aircraft constructions 202
Muzalevskiy K. V., Mironov V. L. Thickness measuring of modeled oil-saturated rock with nanosecond bohole electromagnetic loging tool 210
Muzalevskiy K. V., Mironov V. L., Mikhailov M. I. Potential of detection range of borders of oil reservoir using logging tool with broadband electromagnetic pulse 217
Trushnikov D. N., Koleva E., Mladenov G., Shcherbakov A. V. Weld formation control at electron beam welding with beam oscillations 224

PART 4. ECONOMICS

Erygina L. V., Makarenko N. O. Conceptual approach to the definition of the strategic alternatives of the enterprises development of the space-rocket industry 232
Kukushkin S. G., Podverbnikh U. S., Samokhvalova S. M. Formation of innovative readiness of a personnel management system for the benefit of implementation of projects related to aerospace enerprise 239
Nosachevckaya E. A., Klimuk V. V. On the scientific basis level assessment effectiveness regional resources 245
Popova T. S. Structural shifts in the competitive high-tech modern space rocket technology directions of economic system of Russia 250

Information about the authors 263

Раздел
Part
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

УДК 658.5.012.7

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 10–15

МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Ф. А. Акланов, Д. И. Ковалев, Е. В. Туева, П. В. Зеленков, К. К. Першакова

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

Рассматривается построение информационной системы руководства (ИСР) предприятия и ее модельно-алгоритмическое обеспечение. Компоненты системы предоставляют поддержку лицу, принимающему решение, при нахождении оптимального плана распределения запасов между потребителями и планировании закупок. Задача планирования закупок реализуется на основе анализа данных продаж, текущих запросов потребителей, а целью является план закупок, при котором уровень реализации продукции будет максимален. Показано, что важной функцией ИСР является поддержка принятия решений при обеспечении взаимодействия всех подразделений и филиалов предприятия и оперативное предоставление данных об остатках продукции на складах, поступлениях, заказах, реализациях контрагентам и о текущем финансовом состоянии предприятия в целом.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, информационная система управления, модельно-алгоритмическое обеспечение, транспортная задача.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 10–15

MODEL-ALGORITHMIC SOFTWARE DECISION SUPPORT IN INFORMATION SYSTEMS MANAGEMENT

F. A. Aklanov, D. I. Kovalev, E. V. Tueva, P. V. Zelenkov, K. K. Pershakova

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

The creation of information systems management (IMR) of the enterprise and its model-algorithmic software is explained. System components provide support to the decision maker (DM), after finding the optimal plan reserves distribution between consumers and procurement planning. The objective of the procurement is based on the analysis of sales data, current consumer needs, and the purpose is the procurement plan, in which the level of sales will be maximized. It is shown that an important function of the information management system is to support decision making while ensuring cooperation between all departments and branches of the company and prompt submission of data on the balance of goods in warehouses, its arrival, purchase orders, implementations counterparties and on the current financial status of the enterprise as a whole.

Keyswords: decision support, information management system, model-algorithmic software, transportation problem.

Введение. В связи с расширением различных сфер бизнеса многие предприятия, для того чтобы быть успешными и конкурентоспособными, должны обеспечивать руководство оперативным предоставлением данных о значениях показателей эффективности работы предприятия [1–4]. Для получения такой информации и решения различных управленческих задач создаются системы поддержки принятия решений (СППР) [5]. СППР – это информационно-аналитическая система, представляющая собой комплекс математического, программного и информационного обеспечения и предназначенная для автоматизации процессов формирования, выбора и обоснования решений при управлении [6; 7]. В зависимости от уровней управления и решения стратегических, тактических или оперативных задач СППР делятся на

крупномасштабные системы поддержки принятия решений [8–10] и информационные системы руководства (ИСР) [11].

В данной статье рассматривается построение ИСР и ее модельно-алгоритмическое обеспечение на примере ИСР Export Management. Важными функциональными задачами в ИСР Export Management являются:

– поддержка лица, принимающего решение (ЛПР), при нахождении оптимального плана распределения запасов между потребителями;

– поддержка ЛПР при планировании закупок (задача планирования закупок реализуется на основе анализа данных продаж, текущих запросов потребителей, причем цель – составить такой план закупок, при котором уровень реализации продукции будет максимален [12]);

– обеспечение взаимодействия всех подразделений и филиалов предприятия;

– оперативное предоставление данных об остатках продукции на складах, поступлениях, заказах, реализациях контрагентам и о текущем финансовом состоянии предприятия.

Оптимальный план распределения запасов. Для нахождения оптимального плана распределения запасов между потребителями в ИСР Export Management используется алгоритм решения многопродуктовой транспортной задачи, где цель – составить такой план перевозок продукции, при котором совокупные транспортные издержки будут минимальны [13]. Рассмотрим решение этой задачи на следующем примере. Предприятие «ЛесЭкспорт» содержит продукцию различного типа древесины: сосна, лиственница, береза, т. е. количество типов продукции К = 3. Головная фирма находится в г. Усть-Илимске (А1), еще два филиала находятся в городах Новосибирск (А2) и Красноярск (А3), запасы продукции указаны в табл. 1, запросы потребителей городов Токио (В1), Пекин (В2), Новокузнецк (В3), Томск (В4) указаны в табл. 2. Табл. 3 является распределительной таблицей.

Таблица 1

Запасы продукции у поставщиков

Поставщики	Запасы, м^3		
	Сосна (К1)	Кедр (К2)	Береза (К3)
Усть-Илимск (А1)	a11=200	a12=130	a13=130
Красноярск (А2)	a21=90	a22=50	a23=40
Новосибирск (А3)	a31=25	a32=30	a33=15

Таблица 2

Запросы продукции потребителей

Поставщики	Заявки, м^3		
	Сосна (К1)	Кедр (К2)	Береза (К3)
Токио (В1)	b11=250	–	b13=100
Пекин (В2)	b21=130	b22=50	–
Новокузнецк (В3)	b31=100	–	b33=70
Томск (В4)	–	b42=65	–

В распределительной табл. 3 указаны стоимости перевозки единицы продукции, где М – очень высокая стоимость. Так как заявки потребителей (В) превышают запасы поставщиков (А) на 55 кубометров, то такая задача называется многопродуктовой незамкнутой транспортной задачей с избытком [13]. Цель решения этой задачи – составить такой план перевозок лесопродукции, при котором совокупные транспортные издержки будут минимальны.

Так как задача многопродуктовая, ее следует разбить на самостоятельные транспортные задачи по виду продукции. В данной задаче три типа древесины, следовательно, количество самостоятельных задач три. Из табл. 3 составим три незамкнутые транспортные задачи и выделим их в табл. 4, 5 и 6.

Таблица 3

Распределительная таблица

(А,В)		В1			В2			В3			В4			Запас, м^3
		В11	В12	В13	В21	В22	В23	В31	В32	В33	В41	В42	В43	
А1	А11	300	М	М	200	М	М	210	М	М	М	М	М	200
	А12	М	М	М	М	200	М	М	М	М	М	200	М	130
	А13	М	М	300	М	М	М	М	М	210	М	М	М	130
А2	А21	400	М	М	100	М	М	110	М	М	М	М	М	90
	А22	М	М	М	М	100	М	М	М	М	М	100	М	50
	А23	М	М	400	М	М	М	М	М	110	М	М	М	40
А3	А31	480	М	М	90	М	М	60	М	М	М	М	М	25
	А32	М	М	М	М	90	М	М	М	М	М	40	М	30
	А33	М	М	480	М	М	М	М	М	60	М	М	М	15
Заявки, м^3		250		100	130	50		100		70		65		В=А+55

Таблица 4

Незамкнутая транспортная задача по перевозке сосны

ПО	B11	B21	B31	ЗАПАСЫ
A11	300	200	210	200
A21	400	100	110	90
A31	480	90	60	25
ЗАЯВКИ	250	130	100	–

Таблица 5

Незамкнутая транспортная задача по перевозке кедра

ПО	B22	B42	ЗАПАСЫ
A12	200	200	130
A22	100	100	50
A32	90	40	30
ЗАЯВКИ	50	65	–

Таблица 6

Незамкнутая транспортная задача по перевозке березы

ПО	B13	B33	ЗАПАСЫ
A13	300	210	130
A23	400	110	40
A33	480	60	15
ЗАЯВКИ	100	70	–

Потребности потребителей продукции составляют 480 м^3, в то время как запасы поставщиков 315 м^3. Запрос превышает запас на 165 м^3, следовательно, эта задача незамкнутая.

Для приведения ее к стандартному виду (задаче замкнутого типа) введем дополнительного фиктивного поставщика, запас которого будет 165 м^3, а стоимости перевозок от фиктивного поставщика (А4ф) до потребителя примем равными нулю, так как реально никаких перевозок по этому маршруту выполняться не будет. В итоге получаем замкнутую задачу, эквивалентную исходной (табл. 7).

Таблица 7

Замкнутая транспортная задача по перевозке сосны

ПО	B11	B21	B31	ЗАПАСЫ
A11	300	200	210	200
A21	400	100	110	90
A31	480	90	60	25
A4ф	0	0	0	165
ЗАЯВКИ	250	130	100	480

Обозначим через X*ij* количество продукции, которое будет вывезено от поставщиков *i* (*i* = 1, 2, 3, 4) и доставлено к потребителю *j* (*j* = 1, 2, 3). Тогда искомый план перевозок, представленный в табл. 8, состоит из 12 управляемых переменных.

Таблица 8

Переменные замкнутой транспортной задачи по перевозке сосны

ПО	B11	B21	B31	ЗАПАСЫ
A11	X11	X12	X13	200
A21	X21	X22	X23	90
A31	X31	X32	X33	25
A4ф	X41	X42	X43	165
ЗАЯВКИ	250	130	100	480

Совокупные транспортные издержки на перевозку рассчитываются по следующей формуле:

$$Z = 300\,X11 + 200\,X12 + 210\,X13 + 400\,X21 + 100\,X22 + 110\,X23 + 480\,X31 + 90\,X32 + 60\,X33 + 0\,X41 + 0\,X42 + 0\,X43, \quad (1)$$

где Z – совокупные транспортные издержки; X*ij* – переменные из табл. 8.

Введение фиктивного поставщика с нулевыми стоимостями никак не влияет на целевую функцию, так как коэффициенты равны нулю.

Ограничения, вытекающие из необходимости удовлетворения потребителей в лесопродукции, следующие:

$$\begin{cases} X11 + X21 + X31 + X41 = 250, \\ X12 + X22 + X32 + X42 = 130, \\ X13 + X23 + X33 + X43 = 100, \end{cases} \quad (2)$$

где X*ij* – переменные из табл. 8.

Ограничения, связанные с необходимостью расходовать весь запас поставщиков:

$$\begin{cases} X11 + X12 + X13 = 200, \\ X21 + X22 + X23 = 90, \\ X31 + X32 + X33 = 25, \\ X41 + X42 + X43 = 165, \end{cases} \quad (3)$$

где X*ij* – переменные из табл. 8.

Все переменные неотрицательные:

$$Xij \geq 0, \quad (4)$$

где X*ij* – переменные из табл. 8.

В результате имеем замкнутую транспортную задачу линейного программирования: необходимо минимизировать целевую функцию (1) при условии, что на переменные наложены ограничения (2)–(4).

Алгоритм решения задачи:

– исходную информацию вводят в документы «Заказы покупателя», указывается номенклатура, характеристики, количество, пункт назначения (адрес доставки);

– в справочник «Маршруты» вносятся стоимости перевозок;

– вычисление целевой функции (этот шаг алгоритма выполняется в два этапа: вначале с помощью

функции СУММПРОИЗВ вычисляют сумму попарных произведений цены перевозки единицы груза от *i*-го поставщика на количество груза X*ij*, поставляемого *j*-му потребителю; затем вычисляется сумма этих промежуточных расходов, т. е. значение целевой функции (1), которую нужно минимизировать);

– исходные ограничения (2)–(4) записывают в преобразованном виде; из регистра «Остатки товаров на складах» запросом извлекаются ограничения (3) на количество продукции, вывозимой от каждого поставщика; из регистра «Заказы покупателей» извлекаются ограничения (2) на количество продукции, поставляемой каждому потребителю;

– методом перебора с наложением ограничений определяется оптимальный план перевозок.

Оптимальный план перевозок, определяющий объемы лесопродукции, вывозимой от *i*-го поставщика и доставляемой *j*-му потребителю, представлен в табл. 9. Минимальные транспортные издержки составляют 59 700 у. е.

Таблица 9

Оптимальный план транспортировки сосны

ПО	B11	B21	B31	ЗАПАСЫ
A11	85	76,94049	38,05951	200
A21	0	53,05951	36,94049	90
A31	0	0	25	25
A4ф	165	0	0	165
ЗАЯВКИ	250	130	100	480

С помощью представленного алгоритма решается задача для каждого вида продукции и определяется оптимальный план перевозок продукции от поставщика к потребителю.

Планирование закупок. Для планирования закупок в ИСР Export Management используется метод планирования и управления по точке заказа, когда предприятие формирует задание поставщикам, если объем его запасов опускается до некоторого предопределенного минимального уровня [12–15]. Главное достоинство этого метода – это его простота. Планирование и управление по точке заказа можно использовать для управления запасами категории C (по классификации ABC), т. е. сравнительно недорогими изделиями или материалами.

Точка заказа – фиксированный уровень запаса, при достижении которого необходимо организовать следующий заказ на поставку. Точку заказа рассчитывают для систем с фиксированным интервалом между заказами, или иначе систем с постоянным уровнем запасов [11]. Если поставка товаров происходит в установленные сроки или же существует необходимость быстро реагировать на изменение сбыта, для расчета запаса используют систему с фиксированным интервалом между заказами (или с постоянным уровнем запасов). В такой системе не рассматриваются фиксированный размер заказа и издержки управления запасами.

В соответствии с рассматриваемым подходом через постоянные промежутки времени проводится проверка состояния запасов, и если после предыдущей проверки было реализовано некоторое количество запаса, то подается заказ на пополнение запасов. Объем заказа определяется по принципу восполнения запаса до максимального желательного уровня. Схема планирования по точке заказа представлена на рисунке.

Максимальный уровень запасов M рассчитывается по формуле

$$M = B + S(L + R), \qquad (5)$$

где B – страховой запас; S – среднесуточный сбыт; L – время доставки заказа; R – интервал времени между проверками.

В системе управления запасами с двумя уровнями, или *Ss*-системе, наряду с максимальным уровнем запасов используется точка заказа:

$$P = B + S(L + R/2). \qquad (6)$$

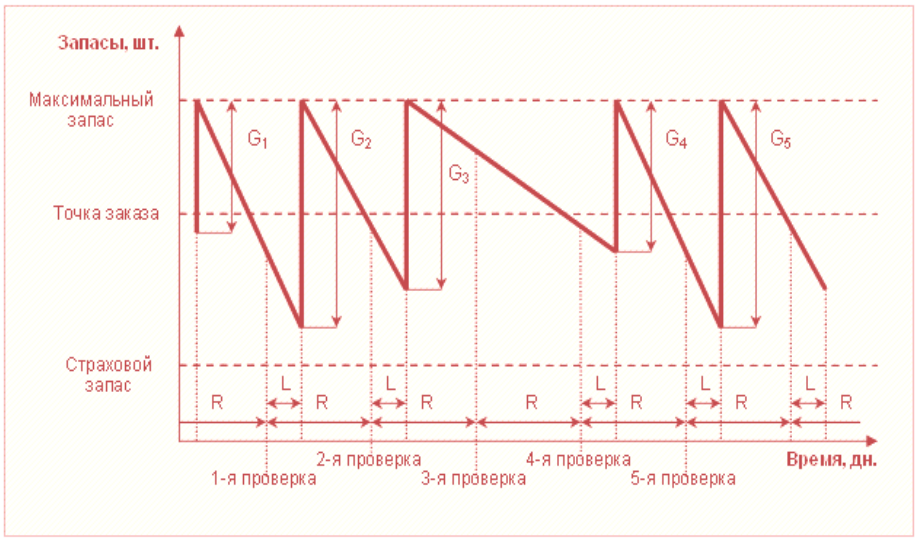


Схема планирования по точке заказа

Поскольку для исполнения заказа требуется определенный период времени, то величина заказываемой партии увеличивается на размер ожидаемого расхода за этот период.

Таким образом, если в момент проверки $J < P$, то подается заказ

$$G = \mathrm{M} - J + S \cdot L, \quad (7)$$

где J – фактический уровень запаса в момент проверки; G – размер заказываемой партии.

В противном случае заказ не подается и процесс повторяется во время следующей проверки.

Алгоритм планирования по точке заказа включает следующие шаги:

– на основании продаж из регистра «Продажи» извлекается количество проданной номенклатуры по периоду, равному месяцу, и делится на количество дней в месяце; таким образом определяем среднесуточный сбыт;

– на основании рассчитанных данных среднесуточного сбыта, страхового запаса, времени доставки заказа вычисляется максимальный уровень запасов по формуле (5);

– на основании рассчитанных данных среднесуточного сбыта, страхового запаса, времени доставки заказа, максимального уровня запасов вычисляется точка заказа по формуле (6);

– определяем фактический уровень запаса на момент проверки; для этого делается запрос по регистру «Остатки товаров на складах», получившееся значение сравнивается с точкой заказа; если фактический уровень запаса ниже точки заказа, то на основании рассчитанных данных максимального уровня запасов, фактического уровня запаса, среднесуточного сбыта и времени доставки заказа вычисляется размер заказываемой партии по формуле (7).

Товары, заказанные для пополнения наличных запасов, должны поступать до или точно ко времени, при котором количество запасов достигает своего минимума. Точка заказа должна выбираться так, чтобы уровень наличных запасов в период до ожидаемой поставки не упал ниже минимального уровня и не привёл к дефициту товаров. При этом важно знать продолжительность выполнения заказа и время, необходимое для его поставки. Предсказать время доставки точно не всегда представляется возможным [16]. При неритмичности поставок следует установить поправочный коэффициент времени на всю продолжительность выполнения заказов. Например, если обычно доставки грузов осуществляются в течение двух недель, а задержки в поставках требуют дополнительной недели, можно считать предполагаемое время доставки груза между 14 и 21 числом месяца.

Размер, продолжительность выполнения и момент возобновления заказа (точка заказа) следует устанавливать для каждого товарного наименования на основе результатов предыдущей работы с данным товаром. Время возобновления заказа рассчитывается на основании частоты обращения товара, транспортных тарифов, а также нормативов, минимального и максимального уровня запасов, установленных для данного товара [17].

Заключение. Таким образом, с помощью математических моделей и алгоритмов, описанных в данной работе, обеспечивается компьютерная поддержка принятия решений при реализации важнейших управленческих задач руководством предприятия, а именно, оптимальное распределение запасов между потребителями и планирование закупок, что позволяет предприятию стимулировать потребительский спрос и быть конкурентоспособным. В рамках модельно-алгоритмического обеспечения задача планирования закупок реализуется на основе анализа данных продаж, текущих запросов потребителей с целью составления плана закупок, при котором уровень реализации продукции будет максимален. Показано, что важной функцией информационной системы руководства является поддержка принятия решений при обеспечении взаимодействия всех подразделений и филиалов предприятия и оперативное предоставление данных об остатках продукции на складах, поступлениях, заказах, реализациях контрагентам и о текущем финансовом состоянии предприятия в целом.

Библиографические ссылки

1. Ковалев И. В., Новожилов А. А., Рукавицына Т. А. Принятие управленческих решений на основе анализа эффективности организационно-технологических комплексов предприятий // Экономика и менеджмент систем управления. 2011. Т. 1, № 1. С. 36–42.

2. Ковалев И. В., Новожилов А. А., Рукавицына Т. А. Анализ эффективности организационно-технологических комплексов предприятий // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т. 42, № 4. С. 36–39.

3. Модели и методы оптимизации сбора и обработки информации / Н. А. Распопин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. № 2. С. 69–72.

4. Kovalev I. V., Yrkov N. S Product characteristics forecasting model with support vectore machines // Вестник СибГАУ. 2009. № 5. С. 107–110.

5. Никитина М. И. Системы и технологии поддержки принятия решений : учеб. пособие для вузов. Красноярск, 2005. 132 с.

6. Антамошкин А. Н., Дегтерев Д. А., Ковалев И. В. Информационные системы управления организационно-технологическими процессами : учеб. пособие / М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Красноярский гос. аграрный ун-т. Красноярск, 2010.

7. К проблеме синтеза распределенных информационно-аналитических систем поддержки принятия решений / П. В. Зеленков [и др.]. Фундаментальные исследования. 2013. № 4–2. С. 286–289.

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

9. Ковалев И. В., Слободин М. Ю., Кустов Д. А. Интеллектуализация информационных технологий

в корпоративных системах // Информационные ресурсы России. 2006. № 3. С. 9.

10. Ковалев И. В., Семенько Т. И., Царев Р. Ю. Модель многокритериального принятия решений при выборе проектов информационно-управляющих систем // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 4 (26). С. 62–66.

11. Урубков А. Р. Курс MBA по оптимизации управленческих решений : учеб. пособие М. : Альпина Паблишер, 2006. 176 с.

12. Фролькис В. А. Введение в теорию и методы оптимизации : учебник. СПб. : Питер, 2002. 314 с.

13. Гартвич А. В. Планирование закупок, производства и продаж в 1С Предприятии 8. СПб. : Питер, 2007. 160 с.

14. Ковалев И. В., Лосев В. В., Каретников К. В. К вопросу повышения эффективности функционирования информационного обеспечения АСУТП // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 8. С. 1–4.

15. Ковалев И. В., Лосев В. В. Реинжиниринг информационного обеспечения интегрированных систем управления производством // Приборы. 2010. № 3. С. 31–36.

16. Ковалев И. В., Золотарёв В. В., Жуков В. Г., Жукова М. Н. Методика построения модели безопасности автоматизированных систем // Программные продукты и системы. 2012. № 2. С. 71–75.

17. Алексеев Н. А., Богданова О. В., Ковалев И. В., Царев Р. Ю. Планирование периодичных задач при распределенной обработке информации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8, № 3. С. 11–14.

References

1. Kovalev I. V., Novozhilov A. A., Rukavicyn T. A. [Decision-making based on the analysis of the efficiency of organizational and technological systems of enterprises.]. *Jekonomika i menedzhment sistem upravlenija.* 2011, vol. 1, no. 1, p. 36–42. (In Russ.)

2. Kovalev I. V., Novozhilov A. A., Rukavicyna T. A. [Analysis of the effectiveness of organizational and technological systems of enterprises.]. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2010, vol. 42, no. 4, p. 36–39. (In Russ.)

3. Raspopin N. A., Karaseva M. V., Zelenkov P. V., Kajukov E. V., Kovalev I. V. [Models and optimization methods of collecting and processing information]. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 2, p. 69–72. (In Russ.)

4. Kovalev I. V., Yrkov N. S [Product characteristics forecasting model with support vectore machines]. *Vestnik SibGAU*. 2009, no. 5, p. 107–110. (In Russ.)

5. Nikitina M. *Sistemy i tehnologii podderzhki prinjatija reshenij* [Systems and technologies of decision support]. Krasnoyarsk, 2005, 132 p.

6. Antamoshkin A. N., Degterev D. A., Kovalev I. V. *Informacionnye sistemy upravlenija organizacionno-tehnologicheskimi processami. uchebnoe posobie dlja studentov, obuchajushhihsja po special'nosti 080801.65 "Prikladnaja informatika v jekonomike"* [Management information system of organizational and technological processes.]. M-vo sel'skogo hoz-va Rossijskoj Federacii, Krasnojarskij gos. agrarnyj un-t. Krasnoyarsk, 2010. (In Russ.)

7. Zelenkov P. V., Kajukov E. V., Carev R. Ju., Shtarik E. N., Shtarik A. V. [The problem of synthesis of distributed information-analytical systems of decision support]. *Fundamental'nye issledovanija.* 2013, no. 4–2, p. 286–289. (In Russ.)

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

9. Kovalev I. V., Slobodin M. Ju., Kustov D. A. [Intellectualization of information technology in corporate systems.]. *Informacionnye resursy Rossii*. 2006, no. 3, p. 9. (In Russ.)

10. Kovalev I. V. Semen'ko T. I., Carev R. Ju. [Multicriteria decision making model while choosing a project management information systems]. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii.* 2006, no. 4 (26), p. 62–66. (In Russ.)

11. Urubkov A. R. *Kurs MBA po optimizacii upravlencheskih reshenij* [The MBA course on the optimization of management decisions]. Moscow, Al'pina Pabl., 2006, 176 p.

12. Frol'kis V. A. *Vvedenie v teoriju i metody optimizacii* [Introduction to the theory and methods of optimization]. St. Petersburg, Piter Publ., 2002, 314 p.

13. Gartvich A. V. *Planirovanie zakupok, proizvodstva i prodazh v 1C Predprijatija* 8. [Planning of procurement, production and sales in 1C Enterprise 8]. St. Petersburg, Piter Publ., 2007, 160 p.

14. Kovalev I. V., Losev V. V., Karetnikov K. V. [The question of improving the performance of information for DCS]. *Promyshlennye ASU i kontrollery*. 2010, no. 8, p. 1–4. (In Russ.)

15. Kovalev I. V., Losev V. V [Reengineering information support of integrated production control systems]. *Pribory*. 2010, no. 3, p. 31–36. (In Russ.)

16. Kovalev I. V., Zolotarjov V. V., Zhukov V. G., Zhukova M. N. [A method of constructing models of automated systems security]. *Programmnye produkty i sistemy.* 2012, no. 2, p. 71–75.

17. Alekseev N. A., Bogdanova O. V., Kovalev I. V., Carev R. Ju. [Scheduling periodic tasks in distributed information processing.]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy.* 2010, vol. 8, no. 3, p. 11–14. (In Russ.)

© Акланов Ф. А., Ковалев Д. И., Туева Е. В, Зеленков П. В., Першакова К. К., 2014

УДК 519.87

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 16–20

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСПЕШНОСТИ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АБИТУРИЕНТОВ

Ш. А. Ахмедова, С. Р. Вишневская, А. А. Коромыслова

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, akoromyslova@mail.ru, vishni@ngs.ru

Представлено решение задачи прогнозирования успешности обучения абитуриентов в случае их зачисления в университет. Для этого были применены различные методы классификации и прогнозирования, а именно: машины опорных векторов, нейронные сети и нечеткие системы, настроенные генетическими и стайными «бионическими» алгоритмами. Для решения указанной задачи были предварительно собраны и предобработаны данные, полученные за время работы приемной комиссии. Кроме того, изначально была решена задача классификации, а именно, поступит или нет выпускник в университет. В итоге было установлено, какие именно сведения, предоставленные абитуриентами, достаточны для определения успешности прохождения первой экзаменационной сессии теми из них, кто поступит в вуз. Результаты решения задачи, полученные методом опорных векторов, оказались наилучшими.

Ключевые слова: успеваемость студентов первого курса, метод опорных векторов, нейронные сети, нечеткие системы, генетические алгоритмы, стайные «бионические» алгоритмы.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 16–20

DATA MINING TOOLS FOR PROSPECTIVE STUDENTS' SUCCESS RATE PREDICTION

Sh. A. Akhmedova, S. R. Vishnevskaya, A. A. Koromyslova

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

The aim of that study was prospective students' success rate prediction in case if they are enrolled at university. For this purpose different classification and prediction methods were used namely support vector machines (SVM), neural networks and fuzzy systems which were obtained by using genetic and bionic algorithms and their modifications. Firstly, meta-heuristic called Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA), that has earlier demonstrated its usefulness on CEC'2013 real-valued optimization competition benchmark and its modification for solving constrained optimization problems, was applied to SVM-based classifiers design. Then genetic algorithm was used for neural networks and fuzzy logic systems automatic generation. Various benchmark classification problems were solved with those approaches. It was established that support vector machines, neural networks and fuzzy logic systems developed in that way outperform many alternative methods on mentioned benchmark classification problems. So the workability and usefulness of proposed classification or prediction algorithms were confirmed. After that for solving of prospective students' success rate prediction problem, in case if they are enrolled at university, information about them obtained during the operational period of Admission Committee was gathered and preprocessed. Eventually it was established which kind of information about a prospective student is enough for determining whether he or she will or will not pass end of first semester exams in case of enrollment. Moreover, it should be noted that support vector machines generated by collective optimization method COBRA have shown the best results.

Keywords: fresh students' success rate, support vector machines, neural networks, fuzzy systems, genetic algorithms, bionic algorithms.

Введение. Подготовка квалифицированных специалистов – одна из главных задач любого образовательного учреждения. Подходом, позволяющим хотя бы приблизительно предсказать возможность успешного поступления и сдачи, к примеру, первых экзаменов (первой экзаменационной сессии), является прогнозирование успешности учебной деятельности студента по информации, доступной на момент его поступления

в вуз. Данная информация сосредоточена в документах приемной комиссии и представляет собой набор разнообразных сведений, выраженных в различных шкалах, чаще всего номинальных (пол, номер школы, город и т. п.) и порядковых (выбранные приоритеты), реже – в дискретных (возраст, результаты сдачи ЕГЭ) и совсем редко – в абсолютных. Результаты обучения студентов, в свою очередь, сосредоточены в документах деканатов и представляют собой сведения в дискретных или порядковых шкалах (оценки, результаты аттестации), а иногда – в номинальных (благодарности, выговоры и т. п.). В данной работе были использованы лишь сведения о поступлении абитуриентов и факте продолжения обучения студента в следующем семестре или его отчислении по результатам сдачи экзаменов.

На успеваемость студента могут влиять многие факторы. Можно выделить следующую группу характеристик для оценивания «перспективности» абитуриента: пол абитуриента, его возраст, адрес проживания, номер школы, выпустившей абитуриента, результаты сдачи ЕГЭ, олимпиад, вступительных экзаменов в вузе (если нет соответствующих результатов по ЕГЭ), выбранные приоритеты при поступлении в вуз. Иными словами, учитывая всю информацию, предоставляемую студентом при поступлении, возможно спрогнозировать, какой в дальнейшем будет его успеваемость, удастся или нет ему пройти хотя бы часть обучения.

Составить единую формальную модель влияния перечисленных факторов на успеваемость будущих студентов непросто: нужно рассматривать как количественные показатели, так и качественные, поэтому можно сказать, что исходные данные являются сложно формализуемыми. Необходимо собрать сведения для формирования базы данных, которая бы использовалась для генерирования интеллектуальной информационной технологии прогнозирования. Таким образом, необходимо построить модель, описывающую связь между группой характеристик абитуриента и его дальнейшей успеваемостью в вузе в случае его поступления, основываясь на сформированной и обновляемой базе данных.

Для этой цели наиболее подходящими инструментами являются искусственные нейронные сети (Artificial Neural Networks, ANN) [1], метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) [2], а также нечеткие системы [3]. В данной работе предлагается генерирование интеллектуальных информационных технологий прогнозирования и классификации на основе перечисленных методов, настроенных коллективным бионическим алгоритмом стайного интеллекта (Co-Operation of Biology Related Algorithms, COBRA) [4] или генетическим алгоритмом [5]. Главная идея метода COBRA заключается в параллельной работе пяти известных алгоритмов, а именно, метода опорных векторов (Particle Swarm Optimization, PSO) [6], алгоритма поиска стаей волков (Wolf Pack Search, WPS) [7], алгоритма летучих мышей (Firefly Algorithm, FFA) [8], алгоритма поиска кукушек (Cuckoo Search Algorithm, CSA) [9] и алгоритма летучих мышей (Bat Algorithm, BA) [10]. Итак, упомянутый алгоритм COBRA был предложен для автоматизации проектирования SVM-«машин», так как по сравнению с обычно применяемыми роевыми алгоритмами он обладает более высокой эффективностью при решении оптимизационных задач с вещественными переменными [11]. Генетический же алгоритм был предложен для автоматизации проектирования нейросетей и нечетких систем. Помимо прочего, также был автоматизирован процесс поиска наиболее информативных данных (входов) при решении подобного рода задач. Подобные алгоритмы генерирования интеллектуальных информационных технологий были рассмотрены ранее в работах [12; 13].

Таким образом, сначала необходимо собрать сведения для формирования базы данных о поступавших абитуриентах. В этой базе данных должны быть их характеристики, а также сведения об их успеваемости во время обучения в вузе (было ли отчисление или нет). Кроме того, после сбора данных должны быть решены две задачи классификации:

– характеристики абитуриента – входные данные, а сведения о том, поступил он или нет – выходные (т. е. всего 2 класса);

– характеристики абитуриента – входные данные, показатели успеваемости – выходные параметры для будущей модели, т. е. определены 3 класса: поступивший абитуриент и сдавший первую экзаменационную сессию, поступивший абитуриент и отчисленный после первой сессии, непоступивший абитуриент.

Собранные данные должны быть предварительно обработаны таким образом, чтобы было возможно их дальнейшее использование при решении описанных задач предлагаемыми методами, а именно, приведены к численному виду и нормированы.

Метод опорных векторов. Метод опорных векторов [2] – алгоритм типа «обучение с учителем», изначально разработанный для решения задач бинарной категоризации. Идея алгоритма заключается в том, что каждый объект из набора данных представляется в виде вектора в пространстве, далее полученные векторы необходимо разделить некоторой гиперплоскостью таким образом, чтобы объекты разных классов были как можно дальше друг от друга. То есть сначала алгоритм обучается на некотором наборе данных, а затем категории новых объектов определяются проверкой, по какую сторону построенной гиперплоскости оказались соответствующие этим объектам векторы в пространстве.

Пусть дан набор данных:

$$X^l = \{(x_1, y_1), \ldots, (x_l, y_l)\}, x_i \in R^m, y_i \in \{-1;1\},$$

где l – это количество объектов в обучающей выборке с m вещественными атрибутами (таким образом, каждый объект в выборке можно представить как вектор размерности m); y_i – класс i-го объекта из выборки.

Как уже отмечалось, в самом общем виде метод опорных векторов заключается в том, что необходимо построить гиперплоскость

$$< w, x > + b = 0,$$

где $w \in R^m, b \in R, < _, _ >$ – скалярное произведение, которая разделяла бы объекты класса –1 от объектов класса 1 в пространстве. Тогда классификация нового объекта осуществляется по следующему правилу:

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

Помимо прочего, в методе опорных векторов предполагается, что расстояние между построенной гиперплоскостью и ближайшими к ней классифицируемыми объектами должно быть максимально возможным. Гиперплоскость с упомянутым выше свойством может быть получена при решении следующей задачи условной оптимизации:

$$\|w\|^2 \to \min,$$

$$y_i(< w, x_i > + b) \geq 1, i = \overline{1, l}.$$

Таким образом, для решения задачи классификации методом опорных векторов необходимо определить вектор w и параметр смещения b, иначе говоря, решить задачу условной оптимизации для построения разделяющей гиперплоскости.

Но как было уже упомянуто, также определялись наиболее информативные входы для решаемой задачи. С этой целью для каждого вектора входных параметров генерировалась бинарная строка, количество бит в строке было равным количеству входов, так что некоторый бит в строке был равен единице, если соответствующий ему параметр стоило учитывать (он был «информативен»), и нулю – в противном случае. Следовательно, помимо построения оптимальной гиперплоскости нужно было решить задачу безусловной оптимизации с бинарными переменными. В итоге генерировалась популяция бинарных строк (различные способы учета входных данных), для каждой строки решалась задача условной оптимизации и строилась гиперплоскость, далее выбиралась строка с лучшим показателем эффективности. После описанного этапа уже выполнялась работа бинарного алгоритма.

В данной работе для настройки поиска информативных входов была применена модификация коллективного бионического алгоритма для решения задач с бинарными переменными, описанная в [14] (COBRA-b), а его модификация для решения задач условной оптимизации (COBRA-c) применялась для нахождения вектора w и параметра смещения b [15]. Итак, COBRA-b использовалась для определения информативных входов: каждый индивид описывал набор параметров. Далее для каждого такого индивида с помощью модификации алгоритма COBRA для решения задач условной оптимизации осуществлялся поиск вектора w и параметра смещения b. В конце выбирался индивид с наилучшим показателем эффективности классификации (т. е. с минимальной ошибкой классификации).

Нейронные сети и системы на нечеткой логике. Для данной работы были реализованы нейронные сети с настраиваемыми структурой и весовыми коэффициентами, а также выбором наиболее информативных входов. Настройка осуществлялась генетическими алгоритмами (ГА). Изначально ГА был использован для настройки весовых коэффициентов полносвязных нейронных сетей прямой проводимости (GA-ANNW) с произвольным числом скрытых слоев и нейронов на них. В качестве активационной функции для нейронов на выходном и скрытых слоях применялась сигмоида. Весовые коэффициенты записывались в хромосому последовательно в виде двоичного кода. Количество используемых бит зависело от точности настройки и разброса возможных значений весов.

Далее решалась задача выбора структуры нейронной сети, а именно, необходимо было определить число слоёв и количество нейронов на них, а также установить вид активационной функции каждого нейрона. Оптимальную структуру могут определить эксперты, но это потребует больших временных затрат и материальных ресурсов, поэтому предлагается вновь использовать генетический алгоритм для автоматического проектирования структуры нейросети (GA-ANNS).

Таким образом, скрытые слои кодировались последовательно. Каждый нейрон был закодирован в четырех битах. Для каждого нейрона сначала случайным образом, с определённой вероятностью, равной 1/3, решалось, будет ли он использоваться в данной сети. Если нейрона в сети не было, то на его место в хромосому записывались нули. В противном случае для него случайным образом выбиралась одна из пятнадцати функций активации [16], номер которой записывался в двоичном коде. Далее для каждой выбранной структуры нейронной сети запускался генетический алгоритм GA-ANNW для выбора весовых коэффициентов.

Так как эффективность применения генетического алгоритма для ИНС зависела от размерности задачи, было целесообразно не учитывать малоинформативные признаки. Особенность генетического алгоритма с выбором наиболее информативных признаков при автоматической настройке нейронной сети (GA-ANNinput) заключается в использовании ГА бинарной хромосомы, в которую нейронная сеть кодируется последовательно: сначала записываются все входные переменные (по одному биту на признак), а затем нейроны со скрытых слоев, кодируемые аналогично GA-ANNS. При инициализации признак считался неинформативным с вероятностью 0,5.

Генетический алгоритм, настраивающий нейронные сети, решает задачу на приемлемом уровне, однако является «черным ящиком». Поэтому предлагается также использовать системы на нечёткой логике. При

работе с системами на нечеткой логике возникают две проблемы: определение способа кодирования лингвистических переменных и выбор оптимальной базы правил. Лучший способ решения этих проблем – работа с экспертом. Однако это требует материальных и временных затрат, а иногда и вообще не представляется возможным. Поэтому предлагается использовать генетический алгоритм для автоматической настройки систем, основанных на нечёткой логике (GA-FL).

Для кодирования лингвистических переменных генерировалась бинарная строка, к которой далее применялись операторы генетического алгоритма. Все нечеткие переменные описываются набором (N, X, A), где N – это название переменной, X – универсальное множество (область рассуждений), A – нечеткое множество на X.

В данной работе одновременно использовались три вида функции принадлежности: треугольная, трапецеидальная и гауссова. Для формирования базы правил также использовалась бинарная хромосома. Количество битов на одно правило зависело от размерности задачи.

Было установлено, что тонность GA-FL заметно падает при росте размерности. Чтобы оставить точность на приемлемом уровне, используя меньше ресурсов, предлагается производить выбор наиболее информативных признаков. Генетический алгоритм для автоматической настройки систем на нечёткой логике с выбором наиболее информативных признаков (GA-FLinput) основан на том же принципе выбора информативных признаков, что и GA-ANNinput.

Прогнозирование успешности учебной деятельности абитуриентов. Описанные ранее алгоритмы были применены для решения двух задач классификации. Первая задача заключалась в определении, поступит или нет абитуриент, соответственно, задача с двумя классами – поступившие и непоступившие абитуриенты. Вторая задача состояла в прогнозировании возможности отчисления или прохождения первой экзаменационной сессии поступившими абитуриентами. Всего для второй задачи были определены три класса: поступившие выпускники школ, отчисленные после первой экзаменационной сессии; поступившие выпускники школ, сдавшие первую сессию; непоступившие абитуриенты.

Для обеих задач использовался один и тот же набор данных, состоявший из сведений об 742 абитуриентах. Каждый поступающий описывался следующими характеристиками: возраст, адрес, пол, баллы за ЕГЭ, сдавали ли экзамен в университете и т. д. Итак, входных параметров было 11, причем первый параметр был идентификатором класса. Все данные были изначально нормированы.

И для первой, и для второй задачи алгоритмы запускались по 20 раз. В таблице приведены полученные результаты, усредненные по количеству запусков, причем в таблице для каждого алгоритма указана доля правильно классифицированных объектов, т. е. абитуриентов.

Результаты работы алгоритмов

Задача	GA-ANNinput	GA-FLinput	SVM+COBRA
2 класса	0,973	0,962	0,991
3 класса	0,931	0,915	0,969

По полученным результатам можно сделать вывод, что на данных задачах метод опорных векторов в среднем работает лучше нейронных сетей и систем на нечеткой логике, причем нейронные сети оказались эффективней метода GA-FLinput. Также стоит отметить, что все время работы всех алгоритмов (время, необходимое для выполнения одного прогона) было примерно одинаковым (около 3–5 минут).

Одной из целей данной работы было определение наиболее информативных входов для этих задач, т. е. определение самых значимых факторов для поступления и сдачи первой экзаменационной сессии. Так, например, наилучший результат (98,7 % правильно классифицированных данных) для задачи с тремя классами был достигнут методом SVM+COBRA при учете следующих входных параметров: вид образовательного учреждения, оконченного абитуриентом, возраст абитуриента, баллы за ЕГЭ по информатике. Для первой же задачи наилучший результат достигался при учете тех же входных параметров, только вместо баллов за ЕГЭ по информатике включались баллы за ЕГЭ по математике. Обращает на себя внимание тот факт, что существенным фактором оказался возраст, хотя, казалось бы, у абитуриентов он практически одинаков. Объяснением этого может быть тот факт, что более старшие абитуриенты, окончившие школу не в текущем году, а ранее, менее успешны при поступлении и дальнейшем обучении. Очевидно, что среди таких поступающих значительная доля не поступивших в прошлые годы или поступивших и отчисленных после первых сессий, т. е. менее пригодных для обучения в вузе.

Заключение. Таким образом, были решены две задачи классификации успешности поступления и учебной деятельности абитуриентов тремя различными способами: методом опорных векторов, нейронными сетями и системами на нечеткой логике, настроенными бионическими, а также генетическими алгоритмами. В итоге было установлено, что для решения обеих задач необходимо учитывать следующие факторы: вид образовательного учреждения, оконченного абитуриентом, и его возраст. Кроме того, в зависимости от решаемой задачи следует также использовать сведения о баллах за ЕГЭ либо по математике (для задачи с 2 классами), либо по информатике (соответственно, для второй задачи с 3 классами).

Библиографические ссылки

1. Bishop C. M. Theoretical foundation of neural networks // Proceedings of Physics Computing 1996. P. 500–507.

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

3. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М. : Физматлит, 2001. 224 с.

4. Akhmedova Sh., Shabalov A. Development and Investigation of Bio-logically Inspired Algorithms Cooperation Metaheuristic // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (GECCO'13) 2013. P. 1417–1418.

5. Гуменникова А. В. [и др.]. Об эволюционных алгоритмах решения сложных задач оптимизации // Вестник СибГАУ. 2003. № 4. С. 14–23.

6. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE Intern. Conf. on Neural Networks, 1995. Vol. IV. P. 1942–1948.

7. Yang Ch., Tu X., Chen J. Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search // Proceedings of the Intern. Conf. on Intelligent Pervasive Computing. 2007. P. 462–467.

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

9. Yang X. S., Deb S. Cuckoo Search via Levy flights // Proceedings of the World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. 2010. P. 210–214.

10. 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.

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

12. Семенкина М. Е. Самоадаптивные эволюционные алгоритмы проектирования информационных технологий интеллектуального анализа данных // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 1. С. 13–23.

13. Семенкин Е. С., Шабалов А. А. Система автоматизированного проектирования коллективов интеллектуальных информационных технологий для задач анализа данных // Программные продукты и системы. 2012. № 4 (100). С. 70–73.

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

15. Akhmedova Sh., Semenkin E., Sergienko R. Automatically Generated Classifiers for Opinion Mining with Different Term Weighting Schemes // Proceedings of the 11th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO'2014). 2014. Vol. 2. P. 845–850.

16. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: http://www.fmi.uni-sofia.bg/fmi/statist/education/textbook/eng/glosa.html.

References

1. Bishop C. M. Theoretical foundation of neural networks. Proceedings of *Physics Computing.* 1996, p. 500–507.

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

3. Kruglov V. V., Dlee M. I., Golunov R. Y. *Nechetkaya logika I iskusstvennye neironnye seti* [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow, Phismatlit Publ., 2001, 224 p.

4. Akhmedova Sh., Shabalov A. Development and Investigation of Bio-logically Inspired Algorithms Cooperation Metaheuristic. Proceedings of the *Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (GECCO'13). 2013, p. 1417–1418.

5. Gumennikova A. V., Emel'janova M. N., Semenkin E. S., Sopov E. A. [About evolutionary algorithms for solving hard optimization problems]. *Vestnik SibGAU.* 2003, no. 4, p. 14–23. (In Russ.)

6. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. Proceedings of *IEEE International Conference on Neural Networks*. 1995, vol. IV, p. 1942–1948.

7. Yang Ch., Tu X., Chen J. Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search. Proceedings of the *International Conference on Intelligent Pervasive Computing*. 2007, p. 462–467.

8. Yang X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. Proceedings of the *5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications*. 2009, p. 169–178.

9. Yang X. S., Deb S. Cuckoo Search via Levy flights. Proceedings of the *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*. 2010, p. 210–214.

10. 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.

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

12. Semenkina M. E. [Effectiveness investigation of adaptive evolutionary algorithms for data mining information technology design]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatie reshenij*. 2013, no. 1, p. 13–23. (In Russ.)

13. Semenkin E. S., Shabalov A. A. [The system of automatic design of intelligent information technologies ensembles for data mining problems]. *Programmnye produkty i sistemy.* 2012, no. 4 (100), p. 70–73. (In Russ.)

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

15. Akhmedova Sh., Semenkin E., Sergienko R. Automatically Generated Classifiers for Opinion Mining with Different Term Weighting Schemes. Proceedings of the *11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (ICINCO'2014). 2014, vol. 2, p. 845–850.

16. Electronic textbook StatSoft. Available at: http://www.fmi.uni-sofia.bg/fmi/statist/education/textbook/eng/glosa.html.

© Ахмедова Ш. А., Вишневская С. Р., Коромыслова А. А., 2014

УДК 621.396.67

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 21–27

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУПОРНОЙ РЕШЕТКИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В ПЛОСКОСТИ РАСКРЫВА РУПОРА

А. М. Бакин, И. В. Трифанов, Л. И. Оборина, Б. Н. Исмаилов

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

Предложен метод приблизительного моделирования рупорных антенн в области КВЧ-диапазона, когда прямое моделирование при помощи специализированных программных пакетов затруднено в связи с высокими требованиями к вычислительным мощностям ЭВМ. Предложенный метод базируется на восстановлении поля в дальней зоне по распределению поля в плоскости раскрыва рупора. Рупорная антенна, которая подвергалась исследованиям, представляет собой рупорную решетку, в состав которой входит пирамидальный рупор с размерами в раскрыве 12,4×12,4+0,01 мм и углом раскрытия 17º30', а также четыре секторальных рупора шириной 3,8 ± 0,01 мм и углом раскрыва 17º30'. Толщина стенки рупора 1,1 + 0,1 мм, радиус сопряжения стенок 0,1 мм. Расстояние между осями боковых рупоров 17 ± 0,01 мм. Высокая точность расположения рупоров необходима для обеспечения электрических параметров и формирования разностной и суммарной диаграмм направленности. Возможны следующие режимы работы антенны с рупорной решеткой: одновременный прием-передача сигнала с различной поляризацией на разных частотах; передача сигнала с различной поляризацией на одной частоте; прием сигнала с различной поляризацией на одной частоте. Диаграмма направленности антенн в первую очередь характеризуется размерами раскрыва рупоров и их электрическими параметрами, а также частотными характеристиками передаваемых волн. В работе применяется анализ отдельных элементов рупорной решетки в программном пакете CST Microwve Studio и последующая обработка полученного распределения поля в точках рупорной решетки для восстановления поля в дальней зоне. Полученные результаты для одиночных элементов решетки хорошо согласуются с результатами прямого моделирования.

Ключевые слова: СВЧ, КВЧ, рупорные антенны, рупорная решетка, численное моделирование.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 21–27

MODELING OF A HORN-BASED LATTICE BASED ON FIELD DISTRIBUTION IN THE PLANE OF APERTURE OF THE HORN

A. M. Bakin, I. V. Trifanov, L. I. Oborina, B. N. Ismailov

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

The method for the approximate simulation thrust antennas in EHF frequencies where direct modeling with the help of the software packages is complicated due to the demanding computing possibilities of computers is proposed. The proposed method is based on the restoration of the far field distribution of the field in the plane of the aperture of the horn. The horn antenna which was applied to researches, represents a horn lattice which is the part of the pyramidal loud-hailer with sizes in aperture 12,4×12,4+0,01 mm, and a disclosure corner 17º30', and also four sectoral loud-hailers 3,8 ± 0,01 mm wide and a corner aperture 17º30'. The thickness of the wall of a loud-hailer of 1,1+0,1 mm, radius of interface of walls of 0,1 mm. The distance between axes of lateral loud-hailers is 17 ± 0,01 mm. High precision of an arrangement of loud-hailers is necessary for ensuring electric parameters and formation of differential and total directional patterns. The following operating modes of the antenna from the horn lattice are possible: simultaneous reception-transmission of a signal with various polarization at different frequencies; signal transmission with various polarization at one frequency; signal reception with various polarization at one frequency. First of all, the irradiator directional pattern is characterized by the sizes of aperture loud-hailers and their electric characteristics, and also frequency characteristics of given waves. The paper applies the analysis of individual elements of the lattice in the software package CST Microwve Studio and subsequent treatment of the resulting field distribution in the lattice points to restore the far field.

Keywords: Microwave, EHF, horn antennas, horn lattice, numerical simulation.

Рупорные антенны обладают рядом достоинств (широкополосность, простота согласования с волноводной питающей линией, низкий уровень боковых лепестков), что обусловливает их широкое применение в области СВЧ- и КВЧ-диапазона. Однако существует ряд недостатков, важнейшим из которых является невозможность обеспечить узкую диаграмму направленности без значительного увеличения длины рупора [1]. Для формирования узких диаграмм направленности часто используются решётки из небольших рупоров [2]. Главная задача при проектировании рупорной решетки – подобрать должным образом амплитуды и фазы их токов [3].

При моделировании антенно-фидерных устройств хорошо зарекомендовали себя специализированные программные пакеты, например Ansoft HFSS и CST Microwave studio, однако прямое моделирование многоэлементной рупорной решетки в частотной области выше 60 ГГц с достаточной точностью предъявляет очень высокие требования к вычислительной мощности ЭВМ, производящей моделирование. В данной работе предлагается приближенный метод решения данной задачи, основанный на вычислении поля в дальней зоне на основе поля в раскрыве рупора.

Предлагается провести моделирование в несколько этапов:

1. Промоделировать распределение поля в раскрыве каждого из элементов рупорной решетки с помощью CST Microwave studio.

2. Восстановить поле в дальней зоне по полю в раскрыве на основе дискретных значений поля в точках сетки, полученных в пункте 1.

3. Сравнить результат моделирования пункта 2 с результатами, полученными для данного элемента решетки с помощью CST Microwave studio.

4. В случае если результаты совпадут с достаточной точностью, провести моделирование по пунктам 1 и 2 для всех элементов решетки.

5. Учесть разность фаз и определить суперпозицией суммарное поле в дальней зоне, создаваемое всей решеткой.

Моделирование производилось для рупорной решетки, состоящей из пяти рупоров (рис. 1, 2). Рупорная решетка включает в себя пирамидальный рупор *1* и четыре секторальных рупора *2*.

Для начала проанализируем центральный пирамидальный рупор исследуемой решетки (рис. 3). Характеристики согласующего соединения выбирались на основе минимизации КСВ на всей области рассматриваемых частот.

Для рупора методом моделирования во временной области (Transient solver) [3] получена частотная зависимость КСВ (рис. 4), диаграмма направленности (рис. 5) и распределение поля в раскрыве рупора (рис. 6).

Можно видеть, что рупор имеет вполне удовлетворительные характеристики по КСВ (не более 1,105) на всем исследуемом диапазоне, но недостаточно узкий главный лепесток диаграммы направленности (ширина главного лепестка 18º).

Для определения поля в дальней зоне по распределению поля в ближней зоне используем зависимость [4]

$$E_\alpha(u,v) = A\cdot\left[\sqrt{1-v^2}\cdot F_x(u,v) + \frac{u\cdot v}{\sqrt{1-v^2}}\cdot F_y(u,v)\right],$$

$$E_\beta(u,v) = A\frac{\sqrt{1-u^2-v^2}}{\sqrt{1-v^2}}\cdot F_y(u,v), \qquad (1)$$

$$F_{x,y}(u,v) = \int\int_{-\infty}^{\infty} E_{x,y}(u,v)\cdot e^{i\cdot k\cdot(u\cdot x+v\cdot y)}dxdy, \qquad (2)$$

где $u = \sin\alpha\cos\beta$, $v = \sin\beta$, $E_{x,y}(x, y)$ – функция распределения x и y компонент E-поля на плоскости апертуры; $F_x(u, v)$ и $F_y(u, v)$ – Фурье-образ распределения поля по направлениям; $E_\alpha(u, v)$ и $E_\beta(u, v)$ – распределение поля в дальней зоне в зависимости от угла.

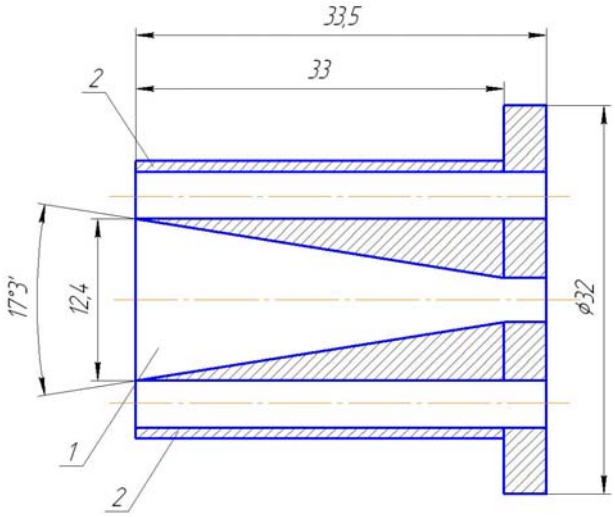


Рис. 1. Эскиз рупорной решетки (вид сбоку)

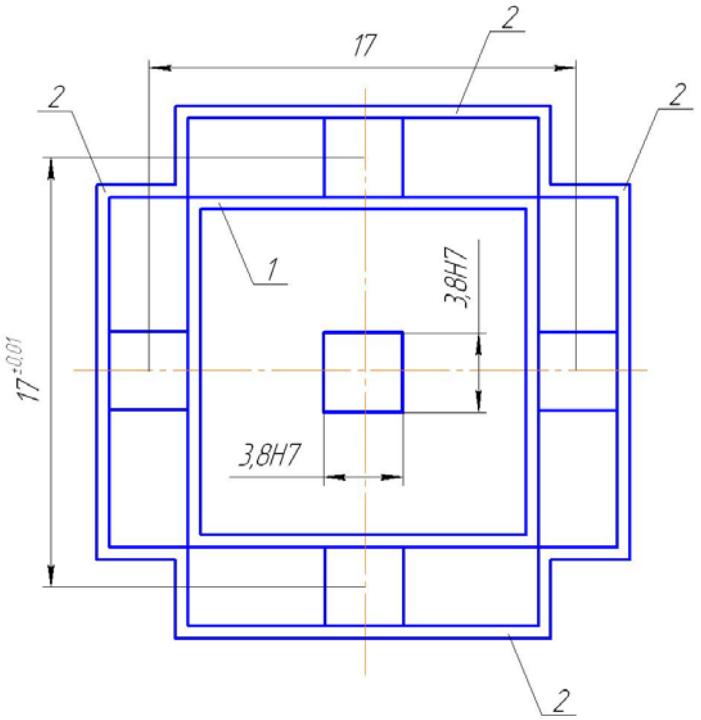


Рис. 2. Эскиз рупорной решетки (фронтальный вид)

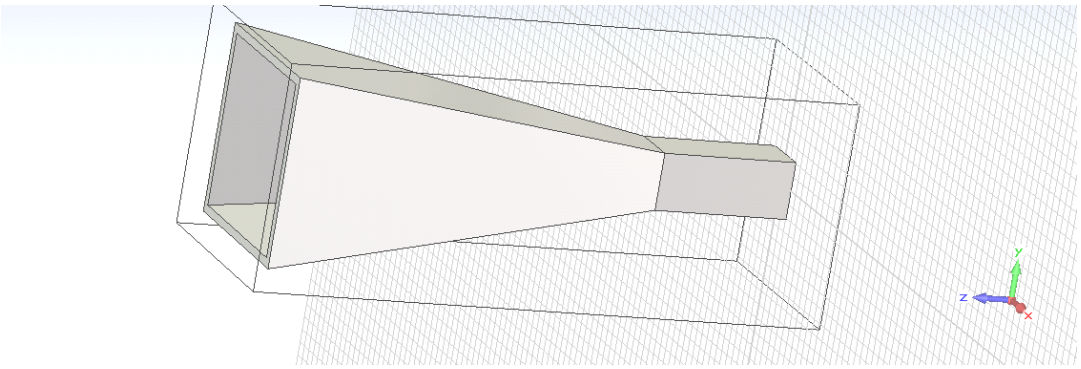


Рис. 3. Модель центрального рупора в программном пакете CST Microwave studio

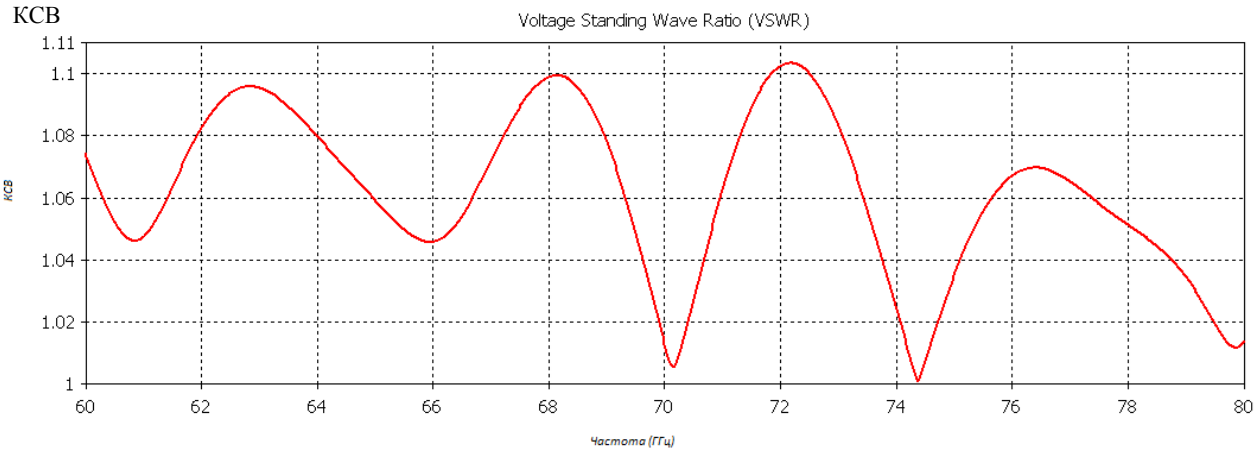


Рис. 4. Частотная зависимость КСВ рупора в диапазоне 60–80 ГГц

Рис. 5. Диаграмма направленности центрального рупора на частоте 70 ГГц

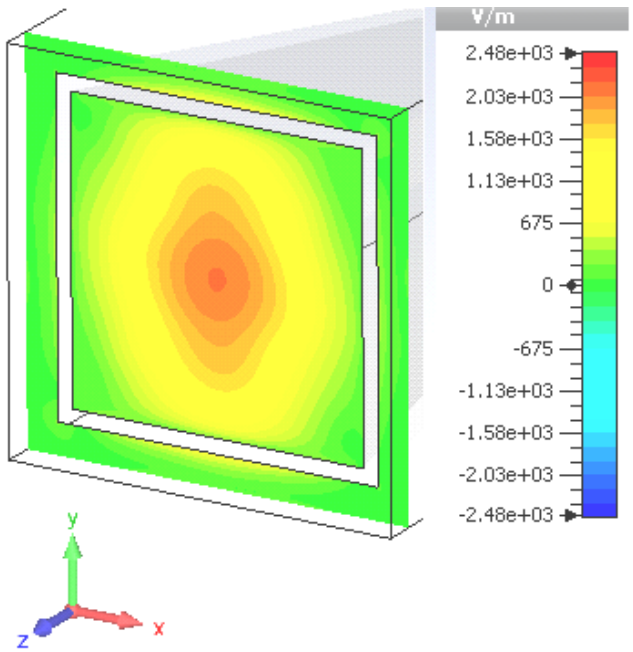


Рис. 6. Визуальное представление распределения абсолютного значения *E*-поля в раскрыве рупора на частоте 70 ГГц. Легенда к цветовым обозначениям приведена на рисунке

То есть составляющие поля в дальней зоне определяются как двумерные преобразования Фурье распределения поля в плоскости раскрыва рупора. Из данных моделирования были созданы массивы, характеризующие *x*, *y* и *z* комплексную компоненту электрического поля в плоскости раскрыва рупора по 2500 точкам на каждую компоненту. Над элементами этого массива было проведено двумерное дискретное преобразование Фурье согласно (2). Поле было восстановлено по (1).

Расчет диаграммы направленности (ДН) по восстановленному полю в дальней зоне представлен на рис. 7. В качестве нормирующего множителя использовался $K = A \cdot b$, где коэффициент A, имеющий смысл уменьшения амплитуды с расстоянием, представлен в (3), а b – согласующий коэффициент для перехода от безразмерной амплитуды к значениям, использованным при прямом моделировании:

$$A = \frac{i}{\lambda R_0} \cdot e^{-ikR_0}, \qquad (3)$$

где R_0 – граница дальней зоны; k – волновое число.

Расчет был выполнен в среде Matlab.

Представленные результаты расчета по (1) и (2) качественно согласуются с результатами моделирования прямым методом на всей области графика и количественно согласуются с хорошей точностью в области главного лепестка (рис. 7 и 5). Можно отметить, что максимум ДН несколько ниже, нежели при прямом моделировании (18,5 dBi и 19,9 dBi соответственно). Расхождения также есть в области боковых лепестков – функция, полученная предло-

женным методом, не имеет такого большого количества локальных экстремумов. Это, по всей видимости, объясняется меньшим количеством точек плоскости, значение поля в которых использовано для расчета. Однако при этом максимальный уровень боковых лепестков количественно согласуется с результатами прямого моделирования, что в сочетании с хорошим согласованием в области главного лепестка ДН позволяет считать, что данный метод приемлем для приближенных расчетов характеристик рупорной решетки.

Далее промоделируем аналогичным образом остальные элементы рупорной решетки и поле, создаваемое ими в плоскости раскрыва. Координаты фазового центра каждого рупора получены прямым моделированием в CST Microwave studio.

После получения распределения *E*-поля на срезе рупорной антенны с учетом суперпозиции полей [5] при учете разности фаз [6] была построена диаграмма направленности рупорной решетки для параметров, представленных на рис. 1, 2. Результат расчета на частоте 70 ГГц представлен на рис. 8.

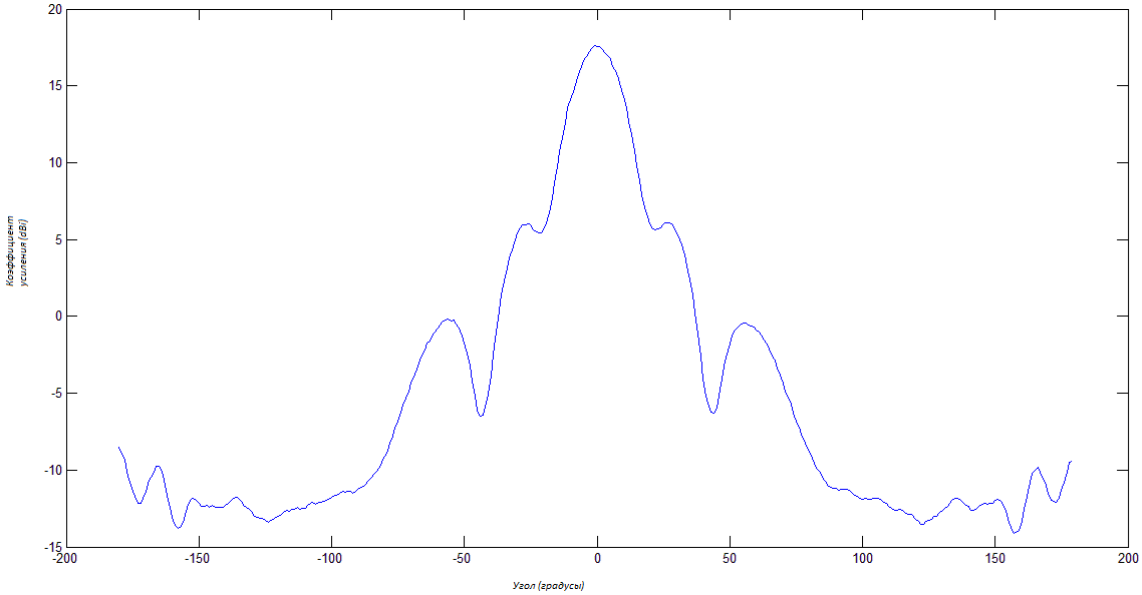


Рис. 7. Аппроксимация диаграммы направленности по полю в дальней зоне на основе двумерного дискретного Фурье-преобразования значений поля в точках плоскости раскрыва рупора

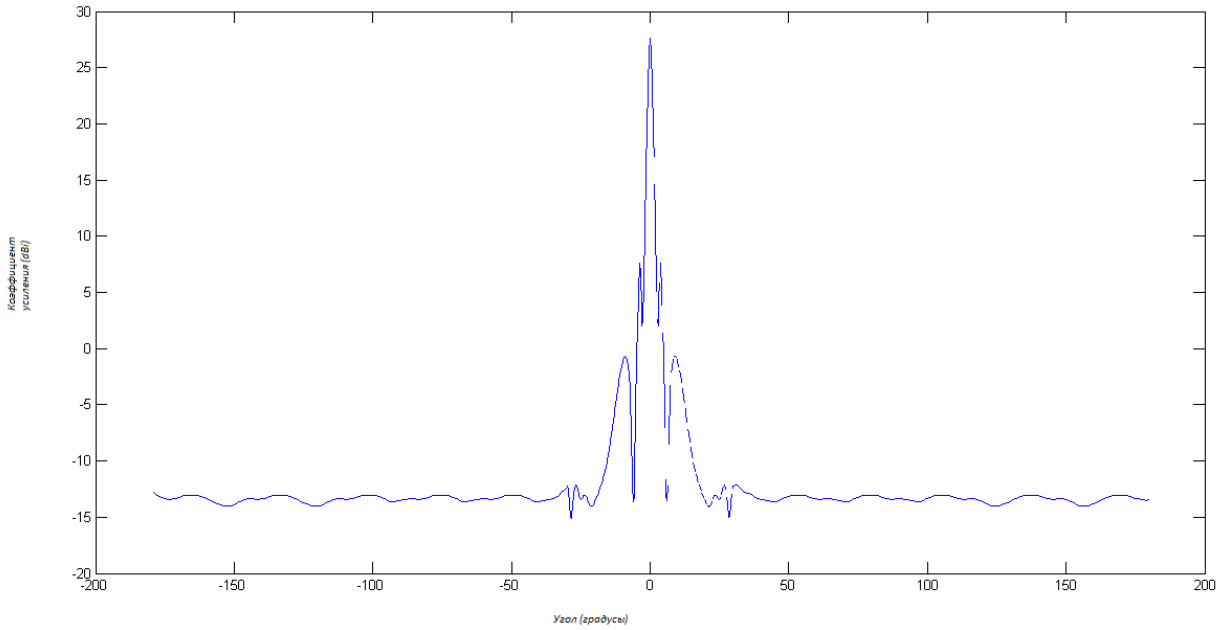


Рис. 8. Диаграмма направленности антенной решетки на частоте 70 ГГц

Можно видеть, что антенная решетка имеет узкий основной лепесток ДН (ширина главного лепестка 4,47°), коэффициент усиления около 29 dBi, а также весьма слабые боковые лепестки. Также можно отметить узкие боковые лепестки с уровнем коэффициента усиления около 7 dBi, плотно примыкающие к главному лепестку ДН. Это указывает на работоспособное соотношение разности фаз главного и боковых рупоров. Работа по оптимизации конструкции может быть продолжена при проведении экспериментальных исследований [7–15].

Предложенный метод позволяет качественно смоделировать диаграмму направленности системы рупорных антенн в области КВЧ-частот. Преимуществом метода является его нетребовательность к вычислительным ресурсам ЭВМ (данная работа была выполнена на двуядерном процессоре 2,8 ГГц, 4 ГБ оперативной памяти). Меньшие требования к вычислительной мощности компьютера связаны с тем, что ресурсоемкое численное решение уравнений Максвелла в пространстве выполняется лишь для плоскости раскрыва рупора. Далее же используется менее ресурсоемкое двумерное дискретное преобразование Фурье. К недостаткам метода можно отнести снижение точности вычисления в области боковых лепестков, однако метод дает качественное представление о среднем уровне диаграммы направленности и ширине боковых лепестков. В области главного лепестка наблюдается хорошее согласование с результатами прямого моделирования.

Библиографические ссылки

1. Воскресенский Д. И. [и др.]. Устройства СВЧ и антенны. М. : Радиотехника, 2006. 250 с.

2. Трифанов И. В., Оборина Л. И., Исмаилов Б. Н. Методы разработки конструкторско-технологических решений и обеспечение качества при изготовлении волноводных элементов КВЧ-диапазона : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. С. 51–54.

3. Oborina L. I., Ismailov B. N., Sterehov I. V., Trifanov I. V. Tehnological maintenance of quality at manufacturing of multichannel wave guides EHF of the range // Vestnik of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. 2010. № 3. P. 99–103.

4. Бахрах Л. Д. [и др.]. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л. : Наука, 1985. 272 с.

5. Hansen T. B. Formulation of Planar Near-Field Sciannig for Time-Domain Electromagnetic Fields // Report for ESTEC. October. 1994.

6. Куприц В. Ю., Мещеряков А. А., Шарыгин Г. С. Моделирование характеристик направленности антенных решеток с элементами Вивальди на наземных трассах // Доклады ТУСУРа. 2013. № 3 (29). С. 24–28.

7. Быстров Р. П., Самойлов С. И., Соколов А. В. Применение миллиметровых волн в системах связи // Зарубежная электроника. 1999. № 10. С. 60–70.

8. Бецкий Р. П., Яременко Ю. Г. Миллиметровые волны и перспективные области их применения // Зарубежная радиоэлектроника. 2002. № 5. С. 42–50.

9. Трифанов И. В. [и др.]. Возможности создания многодиапазонных антенно-фидерных устройств СВЧ- и КВЧ-диапазонов // Вестник машиностроения. 2004. № 7. С. 30–36.

10. Жоую Пи, Фарух Хан. Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона // IEEE Communication Magazine. 2011. Vol. 49, №. 6. P. 101–107.

11. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology : White paper c11-481360. June. 2010.

12. Khan F. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance. Cambridge Univ. Press, 2009.

13. Doann C. H. Millimeterwave CMOS Design // IEEE J. Solid-States Circuits. Jan. 2005.

14. Millimeter wave Propagation: Spectrum Management Implications // FCC, Office of Eng. And Tech. Bulletin № 70. July. 1997.

15. Pozar D. M. Microwave Engineering. 3rd ed. Wiley, 2005.

References

1. Voskresenskij D. I., Gostjuhin V. L., Maksimov V. M., Ponomarjov L. I. *Ustrojstva SVCh i antenny* [Microwave ovens devices and antennas]. Moscow, Radiotehnika Publ., 2006. 250 p.

2. Trifanov I. V., Oborina L. I., Ismailov B. N. *Metody razrabotki konstruktorsko-tehnologicheskih reshenij i obespechenie kachestva pri izgotovlenii volnovodnyh jelementov KVCh – diapazon*a [Methods of development of design-technology decisions and ensuring quality at production of the KVCh waveguide elements – range]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2010, p. 51–54.

3. Oborina L. I., Ismailov B. N., Sterehov I. V., Trifanov I. V. [Tehnological maintenance of quality at manufacturing of multichannel wave guides EHF of the range]. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 4 (25), p. 99–103. (In Russ.)

4. Bahrah L. D. *Metody izmerenij parametrov izluchajushhih sistem v blizhnej zone* [Methods of measurements of parameters of radiating systems in a near zone]. Leningrad, Nauka Publ., 1985, 272 p.

5. Hansen T. B. Formulation of Planar Near-Field Sciannig for Time-Domain Electromagnetic Fields. *Report for ESTEC*, October 1994.

6. Kupric V. Ju., Meshherjakov A. A., Sharygin G. S. [Modelling of characteristics of an orientation of antenna lattices with Vivaldi's elements on land routes]. *Doklady TUSURa*, № 3 (29), 2013, p. 24–28. (In Russ.)

7. Bystrov R. P., Samojlov S. I., Sokolov A. V. [Application of millimetric waves in communication systems]. *Zarubezhnaja jelektronika*. 1999, № 10, p. 60–70. (In Russ.)

8. Beckij R. P., Jaremenko Ju. G. [Millimetric waves and perspective areas of their application]. *Zarubezhnaja radiojelektronika*. 2002, № 5, p. 42–50. (In Russ.)

9. Trifanov I. V., Halimanovich V. I. [Possibilities of creation of the microwave ovens and KVCh multirange antenna-feeder devices of ranges]. *Vestnik mashinostroenija.* 2004, № 7, p. 30–36. (In Russ.)

10. Zhouju Pi., Faruh Han. Introduction in widely band communication systems of millimetric range. *IEEE Communication Magazine*. 2011, Vol. 49, no. 6, p. 101–107.

11. White paper c11-481360, “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology”, June 2010.

12. Khan F. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance. *Cambridge Univ*. Press, 2009.

13. Doann C. H. Millimeterwave CMOS Design. *IEEE Journal Solid-States Circuits*, Jan., 2005.

14. Millimeter wave Propagation: Spectrum Management Implications. *FCC, Office of Eng. And Tech*., Bulletin no. 70, July, 1997.

15. Pozar D. M. Microwave Engineering, 3rd ed. Wiley, 2005.

© Бакин А. М., Трифанов И. В.,
Оборина Л. И., Исмаилов Б. Н., 2014

УДК 62.501

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 28–34

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ СТОХАСТИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ПАМЯТЬЮ

А. В. Банникова[1], А. А. Корнеева[1], М. Е. Корнет[2], Н. А. Сергеева[1]

[1]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: bannikova.anast@gmail.com
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: maria4business@mail.ru

Рассматривается задача непараметрического управления дискретно-непрерывным процессом кислородно-конвертерной плавки стали. Приводятся некоторые результаты моделирования процесса кислородно-конвертерной плавки стали, которые показывают, что процесс ведется в рамках технологического регламента, однако этого не достаточно для качественного управления процессом плавки. Приводятся некоторые результаты моделирования в случае, когда расчетное управляющие воздействие поступает на реальный объект в искаженном в силу ряда причин виде. Предложена двухконтурная схема управления процессом, в которой контур управления, включающий в себя оператора, сохранен, но добавлен внешний контур управления, несущий в себе черты дуализма.

Ключевые слова: идентификация дискретно-непрерывных процессов, непараметрическое управление, объект с памятью, дуальное управление, непараметрическая регрессия, непараметрическая идентификация кислородно-конвертерной плавки.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 28–34

ABOUT NONPARAMETRIC CONTROL OF OBJECT WITH MEMORY

A. V. Bannikova[1], A. A. Korneeva[1], M. E. Kornet[2], N. A. Sergeeva[1]

[1]Siberian Federal University
79, Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: bannikova.anast@gmail.com
[2] Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: maria4business@mail.ru

This article discusses the problem of nonparametric control of discrete-continuous process of BOF steel smelting. The problem of identifying objects with stochastic discrete – continuous nature of the process is also considered. Additionally, the problem of identification and management of multidimensional stochastic systems is investigated in a closed loop, i. e. in the form of a macroscopic object, including a system to – regulator. Moreover, the emphasis is not only on the presence of random noise in different channels of communication, but also on the lack of information about the course of the process. Special attention is paid to the case when the design is applied to control the impact of a real object in a distorted. The dual-process control scheme, in which the control circuit comprising operator saved but added external control loop that carries the features of dualism is proposed. This control scheme allows to increase the quality of management of the entire system as a whole significantly. Some results of numerical simulation of the two-loop circuit control are given. Some results of the modeling process of BOF steel smelting show that the process is conducted in the framework of technological regulations, however, it is not enough for quality control smelting process.

Keywords: Identification of discrete-continuous processes, nonparametric control, object with memory, dual control, nonparametric regression, nonparametric identification for oxygen-converter steelmaking.

Введение. Проблема моделирования, идентификации надолго останется одной из центральных проблем теории управления. Эта проблема продолжает оставаться актуальной для различных реальных процессов дискретно-непрерывного типа.

Предметом исследования настоящей статьи является построение обучающегося, адаптивного управляющегося устройства [1; 2], которое в процессе функционирования улучшает рабочие свойства управляющей системы процесса конвертерной плавки. Прежде всего необходимо произвести моделирование процесса выплавки стали. Кислородно-конвертерная плавка представляет собой процесс изготовления стали из жидкого чугуна без затраты топлива путем продувки чугуна в конвертере технически чистым кислородом, подаваемым через фурму, которая вводится в металл сверху. Управляет процессом кислородно-конвертерной плавки оператор. Вследствие быстротечности процесса оператор должен достаточно быстро принимать управленческие решения, опираясь при этом во многом на свой профессиональный опыт, а также на технологический регламент процесса плавки. Разработка адекватной модели конвертерной плавки предназначена, прежде всего, для ее использования в системе управления.

Моделирование процесса конвертерной плавки стали. В работе рассматривается процесс конвертерной выплавки стали [3], который может быть представлен в виде схемы (рис. 1), на которой показаны входные-выходные переменные процесса.

Входные контролируемые переменные можно разделить на управляемые по ходу процесса и неуправляемые. Применительно к процессу кислородно-конвертерной плавки контролируемыми управляемыми переменными являются: u_1 – расход кислорода на продувку, м^3, u_2 – расход кислорода на прогрев, м^3, расход материалов, т (u_3 – известь, u_4 – электродный бой, u_5 – флюс ФОМИ, u_6 – ФМ-1, u_7 – агломерат офлюсованный, u_8 – уголь ССО), u_9 – продолжительность продувки, мин, u_{10} – расстояние между кислородной фурмой и уровнем ванны конвертера.

В качестве контролируемых неуправляемых по ходу плавки переменных $\mu(t)$ выступают: μ_1 – расход чугуна, т, химический состав заливаемого чугуна, % (μ_2 – кремний (Si), μ_3 – магний (Mn), μ_4 – сера (S), μ_5 – фосфор (P)), μ_6 – температура чугуна, С°, μ_7 – расход лома, т.

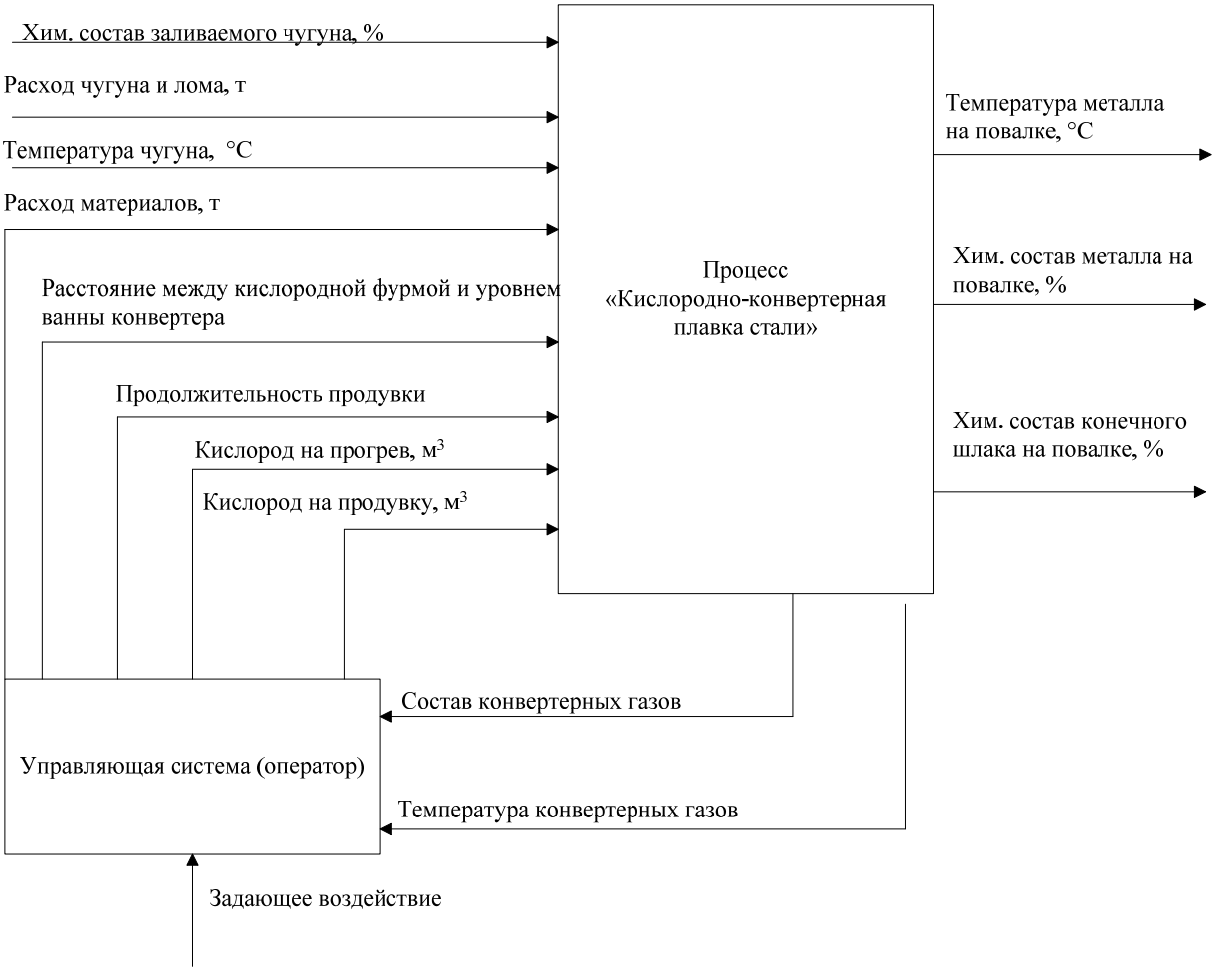


Рис. 1. Входные и выходные переменные процесса конвертерной плавки

К помехам $\xi(t)$, действующим на процесс, относят различные трудноформализуемые факторы. К таким факторам можно отнести состояние сталевыпускного отверстия, тепловое состояние футеровки ковша перед постановкой на выпуск, угар, усвоение присадок и др.

Векторная выходная переменная $x(t)$ характеризует качество конечного продукта кислородно-конвертерной плавки, а именно: химический состав металла на повалке, % (x_1 – углерод (C), x_2 – магний (Mn), x_3 – сера (S), x_4 – фосфор (P)), химический состав конечного шлака на повалке, % (x_5 – CaO, x_6 – SiO_2, x_7 – FeO, x_8 – MgO, x_9 – Al_2O_3, x_{10} – S, x_{11} – MnO, x_{12} – P_2O_5, x_{13} – TiO_2, x_{14} – V_2O_5), x_{15} – температура металла на повалке, C°.

Векторная переменная $\omega(t)$ представляет собой дополнительные сведения о ходе процесса, которые оператор использует для управления: ω_1 – состав конвертерных газов и ω_2 – температура конвертерных газов, C°.

Для исследования процесса кислородно-конвертерной плавки использовалась выборка входных-выходных переменных $\{u_i, \mu_i, x_i\}, i = \overline{1, 35}$, где $u = (u_1, u_2, ..., u_8)$, $\mu = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_7)$, $x = (x_1, x_2, ..., x_{15})$. Выборка представляла собой измерения, полученные при выплавки стали марки Ст3пс/Э в ККЦ № 2 ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат».

Важнейшей выходной переменной является векторная переменная «химический состав металла на повалке», %. Для вычислительного эксперимента были построены 4 непараметрические модели вида

$$x_s^l(u) = \frac{\sum_{i=1}^{35} x_i \prod_{j=1}^{15} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)}{\sum_{i=1}^{35} \prod_{j=1}^{15} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)}, \quad (1)$$

где $l = \overline{1,4}$, объем выборки в данном случае был равен $s = 35$.

Для оценки полученных моделей была использована квадратичная ошибка

$$R_s = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\left(x_i - x_i^s\right)^2, \quad (2)$$

где x_i – измеренное значение выходной переменной; x_i^s – полученная оценка; R_s – квадратичная ошибка.

Непараметрические модели были построены в режиме «скользящего среднего» для выходных переменных x_1, x_2, x_3, x_4. Полученные результаты представлены в таблице, где показаны: квадратичная ошибка моделирования R_s (2), оценка дисперсии D_s выхода объекта x_i, а также ошибка прогнозирования $W = R_s / D_s$.

Из таблицы видно, что ошибка прогнозирования достаточно велика. Это говорит о том, что полученный прогноз является достаточно грубым.

Результаты вычислительного эксперимента

Элемент	Показатель		
	Ошибка R_s	Оценка дисперсии D_s выходной переменной x_i	Отношение W
Углерод, C (x_1)	0,00019778	0,000234	0,845
Марганец, Mn (x_2)	0,0004301358	0,0005404	0,85
Сера, S (x_3)	0,00000755	0,00001183	0,64
Фосфор, P (x_4)	0,00004077	0,000041137	0,99

Вычислительные эксперименты показали, что управление процессом кислородно-конвертерной плавки ведется неудовлетворительно, но, тем не менее, соответствует технологическому регламенту. Иными словами, в рамках технологического регламента управляемый процесс представляет собой «облако», т. е. переменные процесса могут принимать произвольные значения из всей области определения переменных, регламентируемой технологической картой. На нынешних предприятиях технологический регламент чаще всего достаточно широк, и если процесс ведется в рамках технологического регламента, но не рациональным образом, то ожидать конечного продукта высокого качества не следует.

Непараметрическая идентификация в условиях малой текущей информации. Следует отметить, что действия оператора регламентируются технологической картой, а также опытом управления данным объектом. Зачастую его действия по корректировке входных управляемых воздействий по тем или иным причинам не контролируются. Это приводит к тому, что при моделировании исследователь сталкивается с неполнотой текущей информации об объекте, а также о значениях управляемых воздействий, поступающих на объект. В этом случае исследование процесса построения модели представляет специальный самостоятельный процесс.

Пусть объект представляет собой динамическую систему и описывается уравнением: $x(t) = f(x(t-1), x(t-2), ..., x(t-k), u(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t))$, где k определяется на основании имеющейся априорной информации. Блок-схема рассматриваемого динамического процесса представлена на рис. 2, где приняты следующие обозначения: $x(t)$ – выходная переменная процесса, $u(t)$ – входное воздействие, $\mu(t) = \{\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t)\}$ – вектор входных неизвестных, но контролируемых воздействий, $x(t-1)$, $x(t-2)$ – выходы объекта в предыдущих состояниях, $\bar{u}(t)$ – неизвестное входное воздействие, $x^*(t)$ – задающее воздействие, $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта, t – непрерывное время. Контроль переменных осуществляется через интервал времени Δt. Таким образом, мы имеем выборку входных-выходных переменных $\{x_i, \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{13}, \bar{u}_i, i = \overline{1, s}\}$, где s – объем выборки, УУ – устройство управления, блок Н – выполняет роль сумматора входных воздействий $u(t)$ и $\Delta u(t)$.

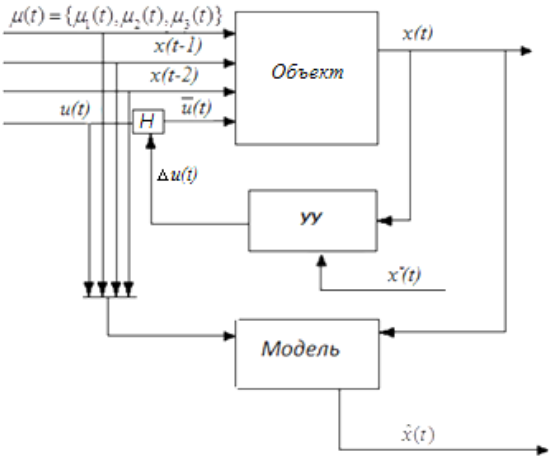


Рис. 2. Блок-схема моделирования динамического процесса

Следует заметить, что $x(t-1)$, $x(t-2)$ фактически играют роль $\mu(t)$, но отличаются от $\mu(t)$ тем, что представляют собой значения выходной переменной на один и более тактов позже, что и характерно для объекта с памятью.

В данном случае задача идентификации состоит в оценивании класса операторов на основе выборки $\left\{x_i, x_{i-1}, x_{i-2}, \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{13}, \overline{u_i}, i=\overline{1,s}\right\}$. В качестве непараметрической модели объекта можно использовать непараметрическую оценку [4]:

$$\overline{x_s}(u,\mu)=\frac{\sum_{i=1}^{s} x_i\cdot\Phi(\frac{u_s-u_i}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-1}-x_{i-1}}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-2}-x_{i-2}}{c_s})}{\sum_{i=1}^{s}\Phi(\frac{u_s-u_i}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-1}-x_{i-1}}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-2}-x_{i-2}}{c_s})}\times$$

$$\times\frac{\Phi(\frac{\mu_{1s}-\mu_{1i}}{c_s})\cdot\Phi(\frac{\mu_{2s}-\mu_{2i}}{c_s})\cdot\Phi(\frac{\mu_{3s}-\mu_{3i}}{c_s})}{\Phi(\frac{\mu_{1s}-\mu_{1i}}{c_s})\cdot\Phi(\frac{\mu_{2s}-\mu_{2i}}{c_s})\cdot\Phi(\frac{\mu_{3s}-\mu_{3i}}{c_s})},\quad (3)$$

где $\Phi(\ )$ – ядерная колоколообразная функция; c_s – коэффициент размытости ядра, которые удовлетворяют следующим условиям сходимости [4].

$$c_s>0;\qquad \Phi(c_s^{-1}(u-u_i))<\infty;$$
$$\lim_{s\to\infty}c_s=0;\qquad c_s^{-1}\int_{\Omega(u)}\Phi(c_s^{-1}(u-u_i))dx=1;\qquad (4)$$
$$\lim_{s\to\infty}sc_s^m=\infty;\qquad \lim_{s\to\infty}c_s^{-1}\Phi(c_s^{-1}(u-u_i))=\delta(u-u_i),$$

Рассмотрим действие исследуемой задачи в ходе численного исследования. Пусть исследуемый объект является динамическим и описывается уравнением вида

$$x(t)=0,1x(t-1)+0,2x(t-2)+3,09u(t)+$$
$$+1,03\mu_1(t)+1,05\mu_2(t)+2,03\mu_3(t),$$

где $x(t)$ – выходная переменных процесса; $u(t)$ – входная переменная процесса; $x(t-1), x(t-2)$ – значение выходной переменной в предыдущие моменты времени; $\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t)$ – контролируемые воздействия.

Пусть входное воздействие имеет вид $u(t)=2+2\sin(0,2t)$.

Входное воздействие, поступающее на объект, примем в виде $\overline{u}(t)=2+1,8\sin\ (1,8t)$, $\mu_1(t)=0,5\cdot\cos\ (0,5\cdot t)$, $\mu_2(t)=0,35\cdot\cos\ (0,4\cdot t)$, $\mu_3(t)=0,2\cdot\sin\ (0,6\cdot t)$.

На рис. 3 представлены графики входных воздействий процесса.

Рассмотрим модели, полученные при различных входных данных. Установим значения переменных: шаг дискретизации – 0,2, объем выборки – 150, помехи отсутствуют (рис. 4).

Квадратичная ошибка модели, представленной на рис. 4, равна 1,54, относительная – 0,36. Как мы можем увидеть из графика функций и значения относительной ошибки, модель получилась достаточно грубой. Сравним полученный результат с моделированием ситуации, когда все входные воздействия, действующие на объект, известны (рис. 5).

Здесь квадратичная ошибка равна 0,16, относительная – 0,03. Как мы и предполагали, модель, полученная в условиях полной текущей информации о входных воздействиях, намного качественней.

Как и следовало ожидать, в первом случае модель объекта с памятью оказалась грубее, чем во втором, при этом важно отметить, что нарушения технологического регламента не происходило. Как и следовало ожидать, действия оператора существено сказываются на управлении, хотя ведутся в рамках технологического регламента. Также была рассмотрена зависимость ошибки моделирования от шага дискретизации и уровня помех. Приведенные исследования открывают возможность для построения внешнего контура управления в дальнейших исследованиях с целью оптимизации ведения технологического процесса в рамках технологического регламента.

Непараметрическое двухконтурное управление процессом конвертерной плавки. Пусть объект представляет собой динамическую систему и описывается уравнением

$$x(t)=f(x(t-1),x(t-2),\ \ldots,x(t-k),$$
$$u(t),\mu_1(t),\mu_2(t),\mu_3(t)),$$

где k определяется на основании имеющейся априорной информации. Блок-схема рассматриваемого динамического процесса представлена на рис. 6.

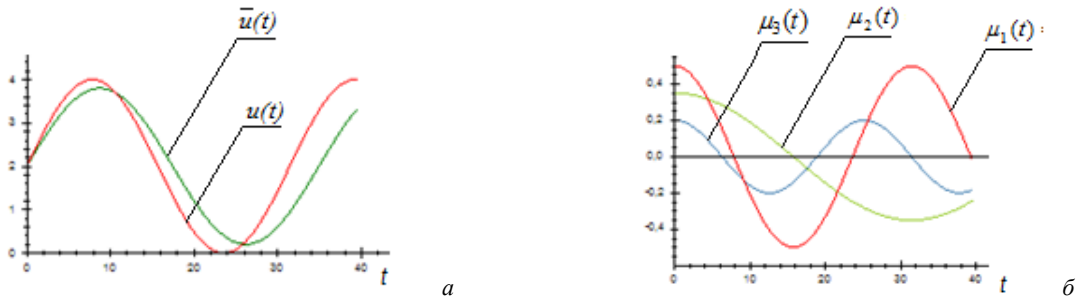


Рис. 3. Входное управляемое воздействие (*а*); вектор неизвестных воздействий (*б*)

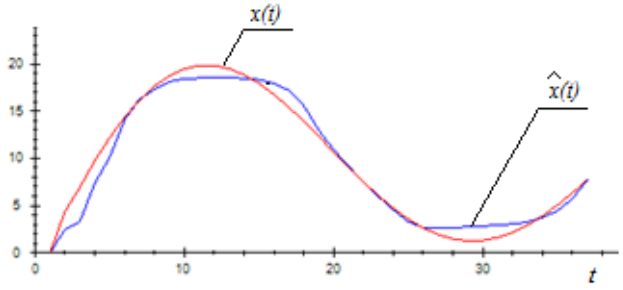


Рис. 4. Выход модели и выход объекта при недостатке текущей информации

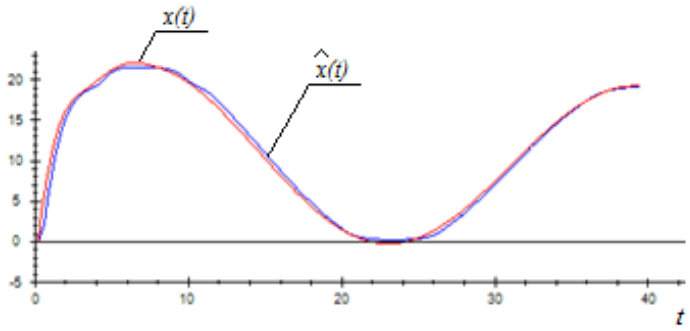


Рис. 5. Выход модели и выход объекта при полной текущей информации

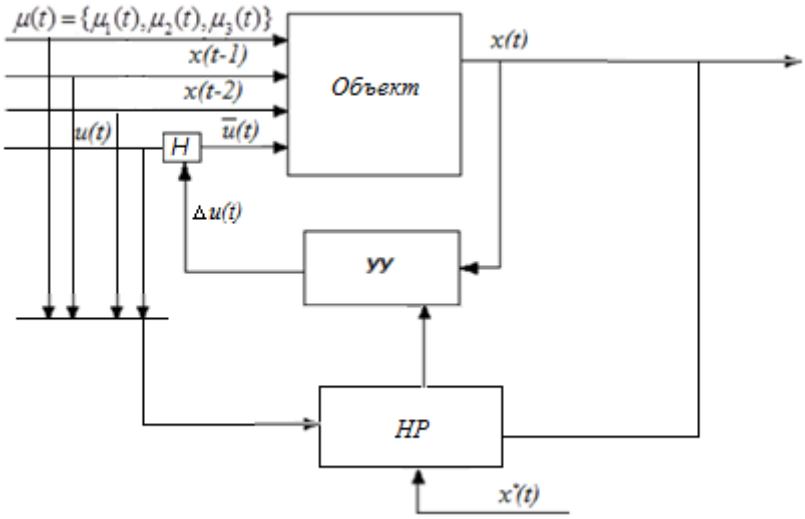


Рис. 6. Двухконтурная схема управления процессом конвертерной плавки стали

Примечательно, что в вышеописанной схеме контур управления, включающий в себя оператора, сохранен, но добавлен внешний контур управления, несущий в себе черты обучаемости и дуализма. Для него объект и оператор (УУ) являются своеобразным макрообъектом.

Очевидно, что управляющие устройство является внешним контуром управления, который позволяет улучшить качество управления объекта.

Дуальное управление. Дуальное управление было открыто А. А. Фельдбаумом и развито на основе теории статистических решений [5]. Такой путь предполагает знание априорной плотности распределения случайных возмущений и параметров управляемого объекта. Если же эти плотности распределения неизвестны, то нужно искать, видимо, новые пути решения задач.

Из изложенного видно, что обучающиеся системы управления являются системами «с памятью», т. е. они не только способны изучать характеристики объекта, но и, сохраняя их в памяти, вырабатывать оптимальные управляющие воздействия. Теория непараметрических систем управления достаточно подробна изложена в [2].

Непараметрический алгоритм дуального управления, подробно описанный в [2], имеет вид

$$u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1}, \qquad (5)$$

где в u_s^* сосредоточены «знания» об объекте; Δu_{s+1} – «изучающие» поисковые шаги:

$$\Delta u_{s+1} = \varepsilon\left(x_{s+1}^* - x_s\right). \qquad (6)$$

В этом и состоит дуализм алгоритма (5). Составляющая u_s^* из (5) будет равна:

$$u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_i \cdot \Phi(\frac{x^* - x_i}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s})}{\sum_{i=1}^{s} \Phi(\frac{x^* - x_i}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s})\Phi(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s})} \times$$

$$\times \frac{\Phi(\frac{\mu_{1s} - \mu_{1i}}{c_s})\Phi(\frac{\mu_{2s} - \mu_{2i}}{c_s})\Phi(\frac{\mu_{3s} - \mu_{3i}}{c_s})}{\Phi(\frac{\mu_{1s} - \mu_{1i}}{c_s})\Phi(\frac{\mu_{2s} - \mu_{2i}}{c_s})\Phi(\frac{\mu_{3s} - \mu_{3i}}{c_s})}, \qquad (7)$$

где x^* – задающее воздействие.

Проанализируем характер дуализма алгоритма (5). На начальной стадии управления основная роль принадлежит второму слагаемому Δu_{s+1} формулы (5). Это случай активного накопления информации в системе дуального управления, который начинается с появления первого наблюдения входной и выходной переменных объекта. По мере процесса обучения (накопления информации) всё возрастающую роль при формировании управляющего воздействия u_{s+1} начинает играть первое слагаемое, т. е. u_s^*. Таким образом, в процессе дуального управления объектом фигурируют как этап изучения объекта, так и этап приведения его к цели.

Приведем некоторые результаты вычислительного эксперимента. Пусть исследуемый объект является динамическим и описывается уравнением вида

$$x(t) = x(t-1) + 2x(t-2) + 3x(t-3) +$$
$$+ u(t) + \mu_1(t) + \mu_2(t) + 2\mu_3(t),$$

где $x(t)$ – выходная переменных процесса; $u(t)$ – входная переменная процесса; $x(t-1), x(t-2)$ – значение выходной переменной в предыдущие моменты времени; $\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t)$ – контролируемые воздействия.

Пусть входное воздействие имеет вид $u(t) = 2 + 2\sin(0,2t)$. Входное воздействие, поступающее на объект, примем в виде $\bar{u}(t) = 2 + 1,8\sin(1,8t)$, $\mu_1(t) = 0,5 \cdot \cos(0,5 \cdot t)$, $\mu_2(t) = 0,35 \cdot \cos(0,4 \cdot t)$, $\mu_3(t) = 0,2 \cdot \sin(0,6 \cdot t)$.

На рис. 7 представлена работа системы управления при ступенчатом задающем воздействии в отсутствии помех.

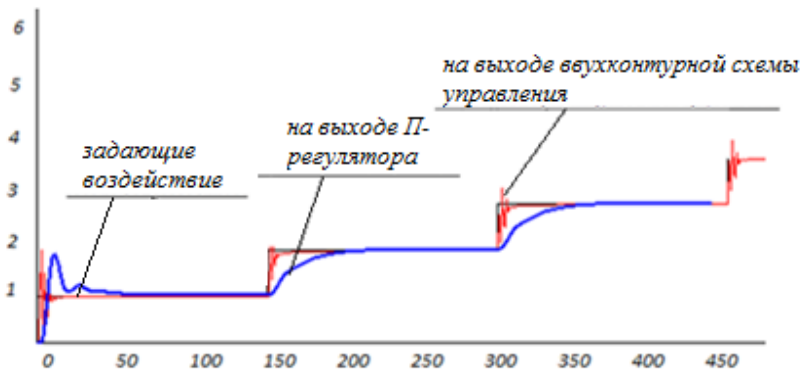


Рис. 7. Работа системы управления при ступенчатом задающем воздействии в отсутствии помех

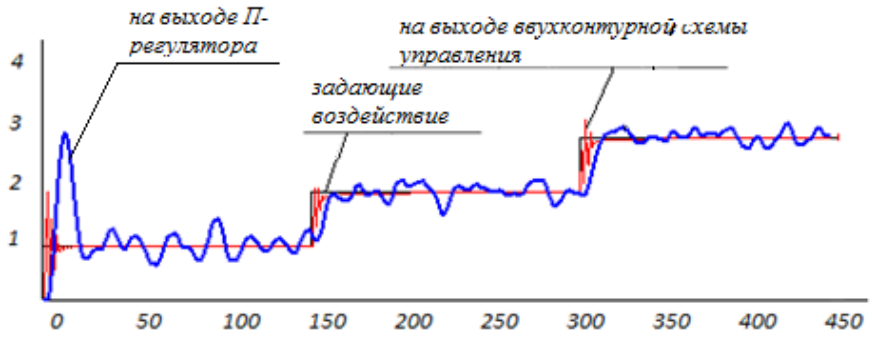


Рис. 8. Работа системы управления при ступенчатом задающем воздействии, помеха 10 %

На рис. 8 изображен случай, когда на объект действует помеха, величиной 10 %.

Подводя итог, следует заметить, что рассматривается очень важная с практической точки зрения задача идентификации в замкнутом контуре для дискретно-непрерывных процессов в условиях непараметрической неопределенности. Актуальность этой задачи обусловлена тем, что при управлении техническими процессами контур управления, включающий оператора, сохранен, но добавляется внешний контур управления, что существенно улучшает качество управления системы в целом.

Приводятся некоторые результаты моделирования процесса кислородно-конвертерной плавки стали, которые показывают, что процесс ведется в рамках технологического регламента, однако этого не достаточно для качественного управления процессом плавки. Приводятся некоторые результаты моделирования в случае, когда расчетное управляющие воздействие поступает на реальный объект в искаженном в силу ряда причин виде.

Основное внимание уделяется построению непараметрической системы дуального управления. Обсуждается проблема дуализма при управлении дискретным непрерывным процессом. Изложены результаты вычислительного эксперимента. Как и следовало ожидать, введение внешнего контура позволяет повысить качество регулирования процесса.

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. 174 с.

3. Воскобойников В. Г. Общая металлургия. М. : Металлургия, 1998. 768 с.

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

5. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.

References

1. Tsypkin J. Z. *Adaptacia I obuchenie v avtomaticheskih sistemah* [The adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.

2. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptacii* [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 174 p.

3. Voskoboinikov V. G. *Obschaya metallurgia* [Overall Metallurgy]. Moscow, Metallurgia Publ., 1997, 768 p.

4. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie ocenki plotnosti veroyatnosti i krivoj regressii* [Non-parametric estimation of the probability density and the regression curve]. Tbilisi, izd. Tbil. un-ta, 1983, 194 p.

5. Feldbaum A. A. *Osnovi teorii optimalnih avtomaticheskih system* [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.

© Банникова А. В., Корнеева А. А., Корнет М. Е., Сергеева Н. А., 2014

УДК 519.87

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 35–41

РАСПОЗНАВАНИЕ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО СТУДЕНТА ПО УСТНОЙ РЕЧИ АДАПТИВНЫМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ*

К. Ю. Брестер, С. Р. Вишневская, 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: christina.bre@mail.ru, vishni@ngs.ru, semenkina.olga@mail.ru

Для преодоления негативных последствий и развития речевой коммуникативной компетенции дистанционного студента необходимо совершенствовать речевые диалоговые системы общения «человек–компьютер», что немыслимо без обеспечения возможности распознавания эмоций и психологического состояния обучающегося. Рассматривается процедура извлечения информативных признаков, основанная на адаптивном многокритериальном генетическом алгоритме, исследуется ее эффективность в сочетании с различными классификационными моделями. Результаты тестирования реализованного алгоритмического аппарата демонстрируют его эффективность и обосновывают целесообразность использования в модулях диалоговых систем, в частности, для распознавания эмоций в процессе дистанционного обучения.

Ключевые слова: дистанционное обучение, интеллектуальная диалоговая система, распознавание эмоций, адаптивный многокритериальный генетический алгоритм, классификатор.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 35–41

SPEECH-BASED EMOTION RECOGNITION OF THE DISTANT STUDENT WITH ADAPTIVE INTELLECTUAL INFORMATION TECHNOLOGIES

Ch. Yu. Brester, S. R. Vishnevskaya, O. E. Semenkina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: christina.bre@mail.ru, vishni@ngs.ru, semenkina.olga@mail.ru

To overcome the negative sides of distance education and to develop the communicative competence of the distant student, it is necessary to improve the interactive dialogue systems, in particular, to realize the opportunity of speaker state recognition.

Although lots of excellent results have already been achieved in this sphere, there are some open questions. Recently scientists have developed various program systems which are good at extracting numerical characteristics from speech-signals. Unfortunately, the amount of features might be huge that becomes a challenge for classification models. Therefore it is significant to determine relevant features from data sets. In this paper we consider the feature selection procedure that is based on the adaptive multi-objective evolutionary algorithm and investigate its efficiency in combination with different classification models. Generally, the feature selection procedure can be organized as a wrapper approach or a filter one. Compared with the wrapper approach, the second technique requires less computational resources and also demonstrates good results. Therefore in this research we implemented the feature selection procedure according to the scheme of the filter approach. Furthermore, to avoid choosing the genetic algorithm settings we developed a self-adaptive modification of the conventional multi-objective genetic algorithm.

Due to application of the self-adaptive heuristic optimization procedure it became possible not only to improve the performance of involved classifiers but also to reduce the number of selected features essentially. Obtained results demonstrate high performance of the developed algorithmic scheme and imply the reasonableness of its usage in the dialogue system modules for recognition of student emotions distantly.

Keywords: distance education, intellectual dialogue system, emotion recognition, adaptive multi-objective genetic algorithm, classifier.

* Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки РФ Сибирскому государственному аэрокосмическому университету, проект № 140/14.

Введение. С развитием современных информационных и телекоммуникационных технологий широкое распространение получило дистанционное обучение как один из вариантов получения высшего образования.

На данный момент это современный и популярный вариант подготовки специалистов как в России, так и во всем мире. Среди преимуществ дистанционного образования выделяют не только его мобильность и возможность выполнения заданий в любое удобное время, но и индивидуализацию процесса обучения.

Однако стоит отметить, что дистанционное образование в существующей его форме подменяет живое общение шаблонным в виде «диалога с компьютером», что негативно сказывается на развитии диалогического общения учащихся, формировании и формулировании мысли на профессиональном языке.

Для России дистанционное обучение является новым образовательным стандартом, появившимся совсем недавно, но уже успевшим завоевать свое место в педагогической среде. Дистанционные программы позволяют снизить затраты на проведение обучения, повысить качество образования за счет применения современных технологий (например объемных электронных библиотек), создать единую образовательную среду. Сейчас в нашей стране действуют более 70 центров дистанционного образования, причем это не только высшее, но также среднее, постдипломное образование и различные курсы, семинары, тренинги. В последние годы Правительством РФ неоднократно подчеркивалась приоритетность развития данной формы обучения.

В процесс дистанционного образования активно внедряются различные средства информационных технологий и массовых телекоммуникаций, в числе которых интеллектуальные диалоговые системы (ИДС), позволяющие эмулировать общение студента с преподавателем. Однако ИДС должны не просто отвечать на вопросы шаблонными фразами, а вести беседу на естественном языке, подстраиваясь под особенности пользователя, его эмоциональное состояние. Несостоятельность человеко-машинного диалога лишает студента живого общения, которое, как показывают психологи, формирует самостоятельное мышление.

Кроме того, одной из ключевых проблем дистанционного обучения является проблема аутентификации пользователя при проверке знаний. Поскольку до сих пор не предложено оптимальных технологических решений, большинство дистанционных программ по-прежнему предполагает очную экзаменационную сессию.

Для преодоления недостатков ИДС, функционирующих в системах дистанционного обучения, и для повышения качества данной формы образования в целом, предлагается разработать и внедрить эффективные методы распознавания обучающегося и его психоэмоционального состояния по речи.

Постановка задачи. Распознавание обучающегося и его эмоционального состояния предполагает наличие выборочных данных, на основе которых и производится процедура идентификации. На сегодняшний день широкое распространение получили программные системы, специализирующиеся на анализе акустических характеристик речевого сигнала, поэтому извлечение числовых параметров, описывающих речь пользователя, не представляет сложности. Однако количество акустических характеристик достаточно велико, и использование всего набора данных в процессе распознавания является нерациональным: атрибуты могут иметь низкий уровень вариации, коррелировать друг с другом или содержать зашумленные данные, снижающие точность проектируемой на их основе системы.

Поэтому важной задачей в процессе идентификации обучающегося и его эмоций является извлечение информативной подсистемы признаков, используемых алгоритмами распознавания. Задача распознавания пользователя диалоговой системы (дистанционного студента), его персональных характеристик (эмоциональное состояние и т. п.) представляет собой задачу классификации (обучение с учителем).

Разрабатываемый подход. Нередко стандартные методы извлечения информативных признаков (метод главных компонент, факторный анализ [1]) демонстрируют свою неэффективность при работе с базами данных, вектор признаков которых имеет высокую размерность. Именно в таких случаях целесообразным является разработка методов, основанных на привлечении эвристических оптимизационных процедур [2].

В общем случае процедура отбора информативных признаков может быть построена по одной из двух схем [3]:

1. Первая схема (со встроенным классификатором) базируется на оптимизации критерия, отражающего точность классификации на фиксированном наборе признаков. Для оценки данного критерия используется классификационная модель, чем и объясняются высокие вычислительные и временные затраты при применении данного подхода.

2. Схема «фильтр» оперирует метриками, характеризующими релевантность набора признаков. В качестве критериев могут быть использованы внутри- и межклассовое расстояние, энтропия, мера несостоятельности и пр. [4]. Данный подход соответствует этапу предобработки данных и не требует сведений об эффективности классификатора на текущем наборе признаков, за счет чего и является более выгодным в смысле вычислительных ресурсов.

В работе [5] было показано, что, несмотря на использование первой схемой информации о релевантности набора признаков для привлекаемого классификатора, подход «фильтр» также может демонстрировать сопоставимые по эффективности результаты работы. Кроме того, учитывая объемы баз данных, которыми может быть представлена задача распознавания эмоций, приходим к выводу, что наиболее приемлемой является реализация подхода «фильтр».

В качестве критериев, описывающих качество извлеченной подсистемы информативных признаков, были выбраны внутри- (англ. Intra-class distance – IA) и межклассовое расстояния (англ. Inter-class distance – IE):

$$\mathrm{IA} = \frac{1}{n}\sum_{r=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_r} d(p_j^r, p_r) \to \min, \qquad (1)$$

$$\mathrm{IE} = \frac{1}{n}\sum_{r=1}^{k} n_r d(p_r, p) \to \max, \qquad (2)$$

где p_j^r – j-й экземпляр класса r; p – центральный пример набора данных; $d(...,...)$ обозначает евклидову метрику; p_r и n_r соответствуют центральному примеру класса r и числу экземпляров в нем.

Для решения поставленной оптимизационной задачи был выбран многокритериальный генетический алгоритм (ГА), реализующий адаптивную модификацию метода Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) [6]. Известно, что генетические алгоритмы требуют настройки большого количества параметров, в том числе и выбора типа генетических операторов. В предложенной модификации наиболее подходящий на текущем поколении для решаемой задачи вариант оператора выбирается автоматически [7; 8]. Бинарные строки кодируют извлекаемые признаки следующим образом: 1 – информативный признак, 0 – неинформативный признак.

Далее приведена общая схема адаптивной модификации метода SPEA:

1. Инициализация начальной популяции $P_0(t = 0)$.
2. Копирование в промежуточное внешнее множество индивидов, чьи векторы решений недоминируемы относительно P_t.
3. Удаление из промежуточного внешнего множества ($\overline{P}'$) индивидов, доминируемых относительно $\overline{P}'$.
4. Если мощность $\overline{P}'$ больше заданного значения, то применение механизма кластеризации для устранения схожих индивидов.
5. Формирование внешнего множества из индивидов $\overline{P}'$.
6. Применение генетических операторов: селекция, скрещивание, мутация.
7. Проверка выполнения критерия останова: если выполняется – завершить работу алгоритма, иначе – перейти к п. 2.

На шаге 6 необходима настройка генетических операторов [9; 10]: требуется выбрать один из вариантов скрещивания, определить вероятность мутации. В данном методе применяется турнирная селекция (причем отбор индивидов производится не только из текущей популяции, но и из внешнего множества), поэтому задача выбора эффективного типа селекции отсутствует [11].

Вариант адаптивного оператора мутации [12] был заимствован из статьи Дариди:

$$p_m = \frac{1}{240} + \frac{0{,}11375}{2^t}, \qquad (3)$$

где t – номер текущего поколения, для которого рассчитывается вероятность мутации.

Для реализации адаптивного оператора скрещивания были применены идеи коэволюционного ГА [13; 14]. На каждом поколении генерирование новой популяции осуществляется всеми типами скрещивания: вариантам оператора выделяются ресурсы (доля индивидов популяции, генерируемых конкретным типом скрещивания на текущем поколении) в зависимости от числа индивидов во внешнем множестве, сгенерированных при помощи данного варианта скрещивания:

$$b_i = \frac{p_i}{\left|\overline{P}\right|} \Big/ \frac{n_i}{N}, \qquad (4)$$

где p_i – число индивидов во внешнем множестве, сгене-рированных при участии i-го типа оператора скрещива-ния; $\left|\overline{P}\right|$ – мощность внешнего множества; n_i – число индивидов в текущей популяции, сгенерированных с помощью i-го типа оператора; N – мощность популяции.

Для каждого варианта оператора скрещивания вычисляется его «пригодность» q_i по формуле (5):

$$q_i = \sum_{k=0}^{T-1} \frac{T-k}{k+1} b_i, \qquad (5)$$

где T – интервал адаптации; $k = 0$ соответствует последнему поколению в интервале адаптации; $k = 1$ – предыдущему и т. д.

Через каждые T поколений осуществляется попарное сравнение «пригодности» вариантов скрещивания с целью перераспределения ресурсов, согласно правилу (6):

$$s_i = \begin{cases} 0, & \text{if} \quad n_i \le N_{\min}, \\ \mathrm{int}\left(\dfrac{n_i - N_{\min}}{h_i}\right), & \text{if} \quad (n_i - h_i \cdot L) \le N_{\min}, \\ L, & \text{otherwise}, \end{cases} \qquad (6)$$

где s_i – размер ресурса (количество индивидов), отдаваемого i-м алгоритмом каждому победившему его алгоритму; h_i – число поражений алгоритма в попарных сравнениях; $N_{\min}$ – минимально допустимый размер подпопуляции; L – размер штрафа для проигравших алгоритмов. Параметр $N_{\min}$ предназначен для поддержания разнообразия вариантов оператора; L – для перераспределения ресурсов.

Результатом работы многокритериального ГА является множество несравнимых между собой точек – аппроксимация множества Парето. После завершения работы алгоритма для каждой бинарной строки из внешнего множества получаем подсистему признаков, используемых для обучения классификатора. Таким образом, финальное решение о принадлежности объекта к тому или иному классу принимается ансамблем классификаторов по правилу большинства.

Разрабатываемый подход был исследован с привлечением следующих классификаторов:

– полносвязный персептрон (англ. Multilayer Perceptron – MLP) с одним скрытым слоем; для обучения использовался алгоритм обратного распространения ошибки;

– машины опорных векторов (англ. Support Vector Machine – SVM), для обучения которых применялся метод последовательной минимальной оптимизации Дж. Платта;

– логистическая регрессия (англ. Logistic Regression – Logit);

– радиально-базисная нейронная сеть с функцией Гаусса (англ. Radial Basis Function Network – RBF);

– наивный Байесовский классификатор (англ. Naive Bayes);

– деревья решений, для построения которых использовался алгоритм J48 (модификация метода C4.5);

– ансамбль деревьев решений (англ. Random Forest);

– бэггинг (англ. Bagging);

– аддитивная логистическая регрессия (англ. Additive Logistic Regression – LogitBoost);

– алгоритм генерирования правил 1R (англ. One Rule).

В ходе тестирования были использованы реализации данных алгоритмов в программной системе Weka 3.6.10 [15].

Результаты исследования разработанного подхода. На практике для оценки результатов работы классификатора нередко используют матрицу неточностей (англ. confusion matrix), столбцы которой соответствуют экспертным решениям (истинное значение класса), а строки – предсказаниям классификатора (табл. 1). Размерность матрицы $N \times N$, где N – число различных классов в выборке.

Таблица 1

Общий вид матрицы неточностей

		Действительные значения			
		Класс$_1$	Класс$_2$	…	Класс$_N$
Предсказанные значения	Класс$_1$	a_{11}	a_{12}	…	a_{1N}
	Класс$_2$	a_{21}	a_{22}	…	a_{2N}
	…	…	…	…	…
	Класс$_N$	a_{1N}	a_{2N}	…	a_{NN}

Матрица неточностей демонстрирует работу алгоритма и позволяет оценить его эффективность для каждого класса, содержащегося в выборке. Для этого вводятся специальные метрики – полнота и точность, определяемые следующим образом. Пусть построена матрица неточностей $A = (a_{ij})$, тогда полнотой в пределах класса l (англ. recall) назовем величину, равную доле экземпляров данного класса, найденных классификатором, относительно всех примеров данного класса в тестовой выборке:

$$\text{recall}_l = \frac{a_{ll}}{\sum_i a_{il}}. \quad (7)$$

Точностью в пределах класса l (англ. precision) назовем величину, равную доле примеров в тестовой выборке, действительно принадлежащих классу l относительно всех экземпляров, которые были отнесены к данному классу:

$$\text{precision}_l = \frac{a_{ll}}{\sum_j a_{lj}}. \quad (8)$$

Чем выше точность и полнота, тем качество работы классификатора лучше. Однако при решении практических задач редко удается добиться максимальных значений обеих метрик одновременно. Поэтому часто используют такой показатель, как F-score, объединяющий в себе информацию и о точности, и о полноте классификатора:

$$\text{F-score} = 2 \cdot \frac{\text{Recall} \cdot \text{Precision}}{\text{Recall+Precision}}, \quad (9)$$

где $\text{Recall} = \sum_l \text{recall}$, $\text{Precision} = \sum_l \text{precision}$.

Исследование эффективности предложенного подхода проводилось с использованием баз данных Berlin [16], SAVEE [17] и LEGO [18], содержащих характеристики голосовых записей на немецком, английском и английском языках соответственно (табл. 2). При анализе каждой аудиозаписи с помощью программных систем OpenSMILE [19] и Praat [20] было получено 384 признака: максимальное, минимальное, среднее значения или среднеквадратическое отклонение акустических характеристик, описывающих речевой сигнал, его высоту, вибрации, интенсивность и т. п.

Таблица 2

Описание используемых баз данных

Название базы данных	Язык	Объем базы данных	Классы
Berlin	немецкий	535	Нейтрально, злость, страх, счастье, грусть, скука, отвращение
SAVEE (Surrey Audio-Visual Expressed Emotion)	английский	480	Злость, отвращение, страх, счастье, грусть, удивление, нейтрально
LEGO	английский	4827	Нейтрально, злость, тишина / шум

Для сравнения эффективности работы классификаторов на полном и сокращенном наборе признаков была использована процедура кроссвалидации: каждая выборка случайным образом делились на 6 стратифицированных частей.

На этапе отбора информативных признаков генетическому алгоритму было выделено следующее количество ресурсов: 100 индивидов и 100 поколений. Настраиваемые параметры приняли следующие значения: размер внешнего множества – 30, время адаптации – 5 поколений, размер штрафа – 10 индивидов и «социальная карта» – 10 индивидов.

В табл. 3 представлен пример матрицы неточностей, полученной при классификации экземпляров базы данных Berlin с помощью машин опорных векторов на полном наборе признаков.

Точность и полнота системы в целом приняли следующие значения: Precision = 82,14 %, Recall = = 81,28 %. Тогда показатель F-score равен:

$$\text{F-score} = 2 \cdot \frac{81,28 \cdot 82,14}{81,28 + 82,14} = 81,71\ \%. \qquad (10)$$

Подобным образом были вычислены значения показателя F-score в остальных экспериментах. Табл. 4 содержит результаты классификации на полном и сокращенном наборе признаков для трех баз данных.

При этом число признаков, используемых алгоритмом классификации, для базы данных Berlin было сокращено в среднем с 384 до 182,2, для SAVEE – до 178,3, для LEGO – до 180,9.

Анализ полученных результатов показал, что разработанная методика в большинстве случаев позволяет не только повысить качество работы классификатора, но и существенно сократить количество признаков, используемых при распознавании эмоций говорящего (приблизительно в два раза). Причем для некоторых классификаторов улучшение показателя F-score составляет десятки процентов (до 44 % для ансамбля деревьев решений на базе данных SAVEE). Следует также заметить, что ухудшение в работе классификаторов SVM, Logit и LogitBoost для базы данных LEGO невелико – около 1 %. В большинстве же экспериментов предложенный метод отбора информативных признаков демонстрирует свою высокую эффективность.

Таблица 3

Пример матрицы неточностей для базы данных Berlin, полученной на полном наборе признаков с помощью машин опорных векторов

		Действительные значения							
		Счастье	Нейтрально	Злость	Грусть	Страх	Скука	Отвращение	Точность в пределах класса, %
Предсказанные значения	Счастье	49	2	14	0	10	0	2	63,64
	Нейтрально	1	70	0	0	0	9	0	87,50
	Злость	13	0	113	0	3	0	1	86,92
	Грусть	0	0	0	52	2	7	1	83,87
	Страх	7	1	0	1	53	1	2	81,54
	Скука	0	6	0	7	0	64	3	80,00
	Отвращение	1	0	0	2	1	0	43	91,49
	Полнота в пределах класса, %	69,01	88,61	88,98	83,87	76,81	79,01	82,69	

Таблица 4

Результаты тестирования предложенного подхода

	Berlin			SAVEE			LEGO		
	F-score, %		Улучшение, %	F-score, %		Улучшение, %	F-score, %		Улучшение, %
	Все признаки	После ГА		Все признаки	После ГА		Все признаки	После ГА	
MLP	82,87	82,26	–0,74	61,72	63,58	3,01	67,53	71,70	6,18
SVM	81,71	82,14	0,53	59,22	60,77	2,62	70,81	69,88	–1,31
Logit	80,04	82,15	2,64	57,20	63,46	10,95	70,75	69,82	–1,31
RBF	68,93	71,59	3,85	43,27	44,15	2,03	52,61	61,31	16,53
Naive Bayes	66,91	67,45	0,81	43,64	45,53	4,33	57,00	59,43	4,26
J48	50,15	51,96	3,60	42,46	47,79	12,55	57,55	64,90	12,77
Random Forest	54,69	73,43	34,27	38,60	55,73	44,38	65,47	68,47	4,58
Bagging	60,60	63,29	4,43	42,99	52,91	23,07	67,53	68,06	0,79
Logit Boost	66,66	71,21	6,82	49,08	52,22	6,40	67,66	67,04	–0,92
OneR	29,20	29,20	0,00	30,41	30,41	0,00	59,01	59,01	0,00

Заключение. Для повышения качества дистанционного образования необходимо совершенствовать диалоговые системы, являющиеся ключевым звеном человеко-машинной коммуникации. В данной статье обосновывается актуальность задачи распознавания эмоций дистанционного студента как основной возможности персонализации ответов ИДС, а также предлагается подход для ее решения, сочетающий в себе работу классификатора с процедурой извлечения информативных признаков, основанной на применении адаптивного многокритериального ГА. В ходе экспериментов была продемонстрирована высокая эффективность реализованной алгоритмической схемы, что является основанием ее возможного внедрения в модули диалоговых систем, функционирующих в сфере дистанционного образования.

Процесс удаленного обучения практически лишен «живого» общения, что негативно сказывается на коммуникативных навыках студента. Распознавание персональных характеристик обучающегося, его психоэмоционального состояния представляет собой актуальное направление развития диалоговых систем, необходимых для организации дистанционного образования. Во-первых, ориентация на студента, учет его эмоций позволят сделать процесс обучения менее искусственным, что, в свою очередь, поможет вызвать дополнительный интерес к данной форме образования. Кроме того, использование информации о пользователе ИДС позволяет строить более точные модели для распознавания речи человека.

Описанный в статье подход может быть распространен на задачи идентификации личности студента, его пола и возраста, которые также имеют место в процессе удаленного обучения.

Интеграция интеллектуальных модулей в диалоговую систему, предназначенных для распознавания психоэмоционального состояния человека, сводится к внедрению блоков, реализующих акустический анализ голосового сигнала, и алгоритма обучения системы, примеры которого также представлены в данной статье.

Библиографические ссылки

1. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности : справ. изд. / С. А. Айвазян [и др.] ; под ред. С. А. Айвазяна. М. : Финансы и статистика, 1989, 607 с.

2. 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.

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

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Semenkin E., Semenkina M. 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.

8. Семенкина М. Е. Самоадаптивные эволюционные алгоритмы проектирования информационных технологий интеллектуального анализа данных // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 1. С. 13–23.

9. Khritonenko D. I., Semenkin E. S. Distributed self-configuring evolutionary algorithms for artificial neural networks design // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 112–116.

10. Stanovov V. V., Semenkin E. S. Self-adjusted evolutionary algorithms based approach for automated design of fuzzy logic systems // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 148–152.

11. Eiben A. E., Hinterding R., Michalewicz Z. Parameter control in evolutionary algorithms // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1999. 3(2). Pp. 124–141.

12. Daridi F., Kharma N., Salik, J. Parameterless genetic algorithms: review and innovation // IEEE Canadian Review. 2004. (47). P. 19–23.

13. 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.

14. Сергиенко Р. Б. Исследование эффективности коэволюционного генетического алгоритма условной оптимизации // Вестник СибГАУ. 2009. № 3. С. 31–36.

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

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

17. Haq S., Jackson P. Machine Audition: Principles, Algorithms and Systems, chapter Multimodal Emotion Recognition // IGI Global, Hershey PA. Aug. 2010. P. 398–423.

18. Schmitt A., Ultes S., Minker W. A parameterized and annotated corpus of the cmu let's go bus information system // In Intern. Conf. on Language Resources and Evaluation (LREC). 2012.

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

20. Boersma P. Praat, a system for doing phonetics by computer // Glot international. 2002. 5(9/10). P. 341–345.

References

1. Aivazian S. A. *Prikladnaja statistika: Klassifikacii i snizhenie razmernosti: Sprav. izd.* [Applied Statistics. Classification and reduction of dimension: Ref. ed.] Moscow, Finance and Statistics Publ., 1989, 607 p.

2. 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.

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

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Semenkin E., Semenkina M. 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.

8. Semenkina M. [Effectiveness investigation of adaptive evolutionary algorithms for data mining information technology design]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatie reshenij.* 2013, no. 1, p. 13–23. (In Russ.)

9. 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.)

10. Stanovov V. V., Semenkin E. S. Self-adjusted evolutionary algorithms based approach for automated design of fuzzy logic systems. *Vestnik SibGAU.* 2013, no. 4 (50), p. 148–152. (In Russ.)

11. Eiben A. E., Hinterding R. and Michalewicz Z. Parameter control in evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, no. 3(2), p. 124–141.

12. Daridi F., Kharma N. and Salik J. Parameterless genetic algorithms: review and innovation. *IEEE Canadian Review*, 2004, vol. 47, p. 19–23.

13. 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.

14. Sergienko R. [Effectiveness investigation of the coevolutionary genetic algorithm for constrained optimization]. *Vestnik SibGAU.* 2009, no. 3 (24), p. 31–34. (In Russ.)

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

17. Haq S., Jackson P. Machine Audition: Principles, Algorithms and Systems, chapter Multimodal Emotion Recognition. IGI Global, Hershey PA, Aug. 2010, p. 398–423.

18. Schmitt A., Ultes S., and Minker W. A parameterized and annotated corpus of the cmu let's go bus information system. *Proceedings of International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, 2012.

19. 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.

20. Boersma P. Praat, a system for doing phonetics by computer. *Glot international,* 5(9/10), 2002, p. 341–345.

© Брестер К. Ю., Вишневская С. Р.,
Семенкина О. Э., 2014

УДК 519.873

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 42–47

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ*

С. С. Бычков, А. М. Попов, В. В. Золотарев

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

Рассматривается вопрос повышения уровня надежности информационных систем путем построения математической модели информационной системы. Для анализа уровня надежности рассмотрены методы расчета уровня надежности информационной системы. Рассмотрены методы, позволяющие повысить уровень надежности информационной системы на различных этапах существования информационной системы. Рассмотрены методы прогнозирования уровня надежности информационной системы, а также вероятности возникновения ошибок при эксплуатации информационной системы. В рамках работы был сформирован комбинированный алгоритм повышения уровня надежности информационной системы в условиях необходимости непрерывной эксплуатации информационной системы на основе применения методов математического моделирования. Результаты работы могут быть применены для проведения экспериментальных исследований по вопросам обеспечения информационной безопасности, оптимизации работы информационных систем.

Ключевые слова: математическое моделирование, оптимизация, надежность, информационная система, анализ.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 42–47

INCREASE OF RELIABILITY LEVEL OF INFORMATION SYSTEMS

S. S. Bychkov, A. M. Popov, V. V. Zolotarev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: bychkovss_va@mail.ru, vm_popov@sibsau.ru, zolotorev@sibsau.ru

In the presented work the question of increase of reliability level of information systems is considered. The problem is solved by creation of mathematical model of information system, as the special case possessing increased requirements to level of reliability, the system of electronic document flow is taken. In this work the analysis of existing methods of an assessment of reliability level of information systems is carried out, the methods allowing to raise reliability level of information system at various operational phases of information system are also considered. Within the methods of an assessmentf of reliability level of information systems methods of forecasting of level of reliability of information system, and also probability of emergence of mistakes are considered at operation of information system. Within the carried-out work the authors have combined the algorithm of increase of reliability level of information system, in the conditions of need of continuous operation of information system on the basis of application of methods of mathematical modeling was created. The work of the combined method also includes the work of a dynamic method of an assessment of reliability level of information system which is the indicator of achievement of an optimum condition of reliability level of information system. The results of work can be applied to carry out pilot studies concerning ensuring information security, optimization of work of information systems.

Keywords: mathematical modeling, optimization, reliability, information system, analysis.

* Работа выполнена в рамках гранта Президента молодым российским ученым – кандидатам наук, договор № 14.124.13.4037-МК от 04.02.2013.

Развитие всех отраслей экономики в настоящий момент выдвигает повышенные требования к эффективности работы организаций. Одним из путей повышения эффективности деятельности стала автоматизация бизнес-процессов. Автоматизация, прежде всего, связана с внедрением информационных систем.

Согласно действующему законодательству РФ информационно-вычислительная система (ИС) – это совокупность данных (баз данных) и программ, функционирующих на вычислительных средствах как единое целое для решения определенных задач [1].

Процесс внедрения и сопровождения ИС неразрывно связан с решением вопроса надежности внедряемой ИС. Надежность ИС можно повышать путем внесения изменений в действующую ИС, однако этот процесс связан с рядом ограничений:

1) временная неработоспособность ИС, которая приводит к простою;

2) вероятность возникновения новых ошибок в работе ИС, исправление которых может потребовать дополнительные ресурсы.

Как можно заметить, ограничения связаны прежде всего с экономической стороной вопроса эксплуатации ИС, а именно, экономическими потерями, связанными с производимой модернизацией ИС.

Надежность ИС является важным эксплуатационным параметром, на который можно воздействовать путем внесения необходимых изменений [2].

На сегодняшний день существует большое количество определений надежности ИС, однако все они формулируют определение в одном направлении. Итак, под надежностью принято понимать комплекс свойств ИС, которые обеспечивают выполнение заданных функций ИС с сохранением во времени и в заданных ограничениях эксплуатационных характеристик. Характеристики определяются показателями, которые поддаются контролю и учету.

В основном в комплекс свойств надежности ИС входят следующие свойства ИС [3]:

1. Безотказность – свойство ИС сохранять работоспособность в течение некоторого времени.

2. Устойчивость – свойство ИС сохранять работоспособность в условиях действия помех.

3. Корректируемость – свойство ИС, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем доработки и модернизации.

4. Защищенность – свойство ИС к невозможности реализации посторонних вмешательств.

Приведенные выше свойства надежности численно выражаются через показатели надежности – количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надежность ИС. Как видно из определения, они служат индикаторами, которые сообщают о текущем состоянии ИС.

В теории надежности в качестве основных показателей надежности ИС принято выделять следующие [3]:

– вероятность безотказной работы ИС $P(t)$;
– вероятность отказа ИС $q(t)$;
– интенсивность отказов ИС $l(t)$;
– средняя наработка ИС на отказ T.

Для расчета показателей надежности информационных систем используются различные подходы, снабженные собственными методиками. Так, принято выделять, следующие подходы при оценке надежности ИС [4]:

1. Динамический – использует результаты выполнения программы.

2. Статический – основан на анализе различных артефактов процесса проектирования.

3. Архитектурный – основан на анализе архитектуры системы и может использовать как динамический, так и статический подходы.

4. Эмпирический – использует информацию о процессе проектирования.

Ввиду того, что задача стоит в анализе уже действующей ИС, то в качестве приоритетных подходов целесообразно выбрать динамический и эмпирический подходы в оценке уровня надежности ИС.

Для выбранных подходов существует несколько методик по оценке уровня надежности ИС.

Динамические методы направлены на поиск и обнаружение в процессе эксплуатации ИС отказов в работе, анализ времени работы ИС при каждом новом запуске и анализ результатов тестов и трасс выполнения функций ИС.

Модель Бернулли [5]. Каждый запуск программы имеет два исхода: правильный и неправильный (с вероятностями p и $1-p$).

Вероятность того, что из n запусков k приведут к неправильному результату, выражается формулой биномиального распределения

$$B\left(p,n,k\right)=C_n^k p^k (1-p)^{n-k}.$$

Вероятность p априорно неизвестна, но по результатам запусков известны n и k. Величина $B(p)$ имеет максимум при $p = k/n$. В качестве оценки надежности программы принимается величина

$$R=1-\frac{k}{n}=\frac{n-k}{n}.$$

Простая интуитивная модель [6]. Предполагается проведение тестирования двумя группами разработчиков независимо. Пусть первая группа обнаружила N_1 ошибок, вторая – N_2; $N_{1,2}$ – это ошибки, обнаруженные обеими группами. Если N – число ошибок в программе, то можно определить эффективность тестирования каждой группы:

$$E_1=\frac{N_1}{N} \text{ и } E_2=\frac{N_2}{N}.$$

Считая возможность обнаружения ошибок одинаковой для обеих групп,

$$E_1=\frac{N_1}{N}=\frac{N_{1,2}}{N_2}\rightarrow N=N_1\frac{N_2}{N_{1,2}}.$$

Модель Миллса [6]. Для оценки достоверности утверждений о числе ошибок в программе в программу также вносится V ошибок. Тестирование выполняется до тех пор, пока не будут найдены все внесенные ошибки, тогда достоверность утверждения, что в программе имеется k ошибок:

$$C = 1, n > k,$$

$$C = \frac{V}{V + k + 1}, n > k.$$

Эти две формулы образуют полезную модель ошибок: первая предсказывает их количество, а вторая позволяет определить достоверность прогноза. Вторую формулу можно модифицировать для случая, когда были найдены не все внесенные ошибки. Пусть число обнаруженных собственных ошибок v:

$$C = 1, n > k,$$

$$C = \frac{C_V^{v-1}}{C_{V+k+1}^{k+v}}, n \le k.$$

Свойства динамических методов [6]:

– достоверность получаемых результатов сильно зависит от качества исходных данных; для оценки достоверности используются метрики покрытия кода;

– при использовании прогнозных моделей обычно не учитываются влияния нерегулярных изменений, имеющих место в процессе разработки и отладки ПО (особенности проекта, неравномерная плотность дефектов, квалификация персонала и др.).

Их достоинства: позволяют получать абсолютные показатели надежности.

Недостатки:

– высокая трудоемкость сбора исходной информации, использование упрощающих предположений о взаимных влияниях программных ошибок;

– сильная зависимость точности прогнозов от качества и объема исходной информации.

Эмпирический подход использует информацию о процессе проектирования [7]:

– организация процесса проектирования, сертификаты, уровень зрелости;

– опыт предыдущих проектов.

Римская модель. Учитывает следующие параметры:

– тип приложения;

– характеристики среды разработки;

– метрики представления и дизайна (управление аномалиями, отслеживаемость, учет качества анализа программного обеспечения);

– метрики реализации (размер программы, модульность программы, степень повторного использования и др.):

$$\delta_0 = A \cdot D\left(SA \cdot ST \cdot SQ\right) \cdot \left(SL \cdot SS \cdot SM \cdot SU \cdot SX \cdot SR\right),$$

$$\mu_0 = F \cdot K\left(\delta_0 \cdot STR_0\right) = F \cdot K \cdot W_0,$$

$$1{,}4 \cdot 10^{-7} \le K \le 10{,}6 \cdot 10^{-7}.$$

Фазовая модель [7]. Оценка надежности с учетом фазы разработки ИС:

– уровень надежности ИС определяется уровнем программистов;

– плотность ошибок – количество ошибок на тысячу строк кода.

Прогнозное число обнаруженных ошибок до момента t

$$V_t = E(1 - e^{-Bt^2}),$$

где коэффициент B рассчитывается с учетом обнаруженных ошибок и фазы каждой ошибки.

При рассмотрении вопроса повышения надежности ИС необходимо обратиться к классическим методам повышения надежности ИС [8]. При этом принято выделять несколько направлений повышения надежности ИС:

1) уменьшение наработки;
2) снижение интенсивности отказов;
3) улучшение восстанавливаемости;
4) резервирование.

Рассмотрим каждое из направлений более подробно.

Уменьшение наработки для выполнения определенной операции достигается выбором максимально быстродействующих элементов и модулей при проектировании ИС. Если увеличение быстродействия и производительности происходит без увеличения интенсивности отказов, то показатели безотказности улучшаются.

Уменьшить наработку возможно полным или частичным выключением отдельных элементов и модулей в паузе между рабочими сеансами, если это не нарушает порядок функционирования ИС.

Прямое влияние на безотказность ИС имеют количество и качество ее элементов и модулей. Улучшить показатели надежности можно за счет комплектации ИС элементами и модулями «повышенной надежности».

Существенного снижения интенсивности отказов можно добиться облегчением режимов работы элементов и модулей ИС. В несколько раз можно снизить интенсивность отказов только за счет снижения производственной нагрузки и создания оптимального распределения функций между различными модулями. На практике этот процесс сводится к оптимизации работы ИС путем создания модулей, решающих конкретную задачу, но зачастую этого невозможно добиться в силу сложности выполняемых бизнес-процессов.

Улучшение восстанавливаемости системы направлено на уменьшение времени обнаружения, локализации (определение места возникновения) и устранения отказов, а также времени ее подготовки к включению после восстановления работоспособности. Автоматизация процессов обнаружения и локализации отказов и предпусковой подготовки ИС существенно снижает время восстановления.

Резервированием называют способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым при выполнении требуемых функций. Резервирование может использоваться не только для повышения надежности,

но и для повышения точности, устойчивости, достоверности.

Таким образом, в рамках поставленных условий можно заметить, что работа, связанная с процессом повышения надежности ИС, сводится к постоянному процессу совершенствования ИС, при этом процесс функционирования ИС приходится приостанавливать, что является отрицательным критерием. Однако существует возможность прогнозирования возникновения ошибок при функционировании ИС. В качестве метода прогнозирования используют математическое моделирование, с помощью которого возможен анализ вероятности возникновения ошибок в работе ИС.

Математическое моделирование позволяет оценить характеристики ошибок в ИС и прогнозировать их появление при эксплуатации [9]. Недостатком является вероятностный характер, при этом достоверность полученных данных зависит от точности математической модели и глубины прогнозирования по времени. Математические модели прогнозируют:

– показатели надёжности ИС в процессе отладки;

– количество невыявленных ошибок;

– необходимое время для обнаружения новой ошибки в ИС;

– необходимое время выявления всех ошибок с заданной вероятностью.

Использование математической модели позволяет эффективнее проводить отладку и испытания модулей ИС.

В настоящее время существует ряд математических моделей, основными из которых являются:

– экспоненциальная модель изменения ошибок в зависимости от времени отладки;

– модель, учитывающая дискретно понижающуюся частоту появления ошибок как линейную функцию времени тестирования и испытаний.

При применении математических моделей существуют допущения о характере проявления ошибок в ИС [10]. Для экспоненциальной модели изменения ошибок в зависимости от времени отладки существуют следующие допущения:

1. Ошибки в ИС являются независимыми и проявляются в случайные моменты времени.

2. Время работы между ошибками определяется средним временем выполнения команды на данной ЭВМ и средним числом команд, исполняемым между ошибками.

3. Выбор отладочных тестов должен быть представительным и случайным, чтобы исключить концентрацию необнаруженных ошибок для некоторых реальных условий функционирования ИС.

4. Ошибка, являющаяся причиной искажения результатов, фиксируется и исправляется после завершения тестирования либо вообще не обнаруживается.

Необходимо отметить, что количество ошибок, проявляющихся в интервале времени, распределено по закону Пуассона [11]. Таким образом, длительность непрерывной работы между искажениями распределена экспоненциально, на этом выводе строится экспоненциальная модель изменения ошибок в зависимости от времени отладки.

Предположим, что в начале отладки ИС при $\tau = 0$ в ней содержалось N_0 ошибок. После отладки в течение времени τ осталось n_0 ошибок и устранено n ошибок ($n_0 + n = N_0$). При этом время τ соответствует длительности работы ИС для обнаружения ошибок и не учитывает простои.

Интенсивность обнаружения ошибок в программе $dn/d\tau$ и абсолютное количество устранённых ошибок связываются уравнением

$$\frac{dn}{d\tau} + kn = kN_0,$$

где k – коэффициент.

Если предположить, что в начале отладки при $\tau = 0$ отсутствуют обнаруженные ошибки, то решение уравнения имеет вид

$$n = N_0\left[1 - \exp\left(-k\tau\right)\right].$$

Количество оставшихся ошибок в комплексе программ

$$n_0 = N_0 - n = N_0 \exp\left(-k\tau\right)$$

пропорционально интенсивности обнаружения $dn/d\tau$ с точностью до коэффициента k.

Время безотказной работы ИС до отказа T или наработка на отказ, которая рассматривается как обнаруживаемый сбой в работе ИС, нарушающий работоспособность, равно величине, обратной интенсивности обнаружения ошибок:

$$T = \frac{1}{\frac{dn}{d\tau}} = \frac{1}{kN_0}\exp\left(k\tau\right).$$

Если учесть, что до начала тестирования в комплексе программ содержалось N_0 ошибок и этому соответствовала наработка на отказ T_0, то функцию наработки на отказ от длительности проверок можно представить в следующем виде:

$$T = T_0 \exp\left(\frac{\tau}{N_0 T_0}\right).$$

Если известны моменты обнаружения ошибок t_i и каждый раз в эти моменты обнаруживается и достоверно устраняется одна ошибка, то, используя метод максимального правдоподобия, можно получить уравнение для определения значения начального числа ошибок N_0:

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{N_0 - (i-1)} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} t_i}{N_0\sum_{i=1}^{n} t_i - \sum_{i=1}^{n}(i-1)t_i},$$

а также выражение для расчёта коэффициента пропорциональности:

$$K = \frac{n}{N_0\sum_{i=1}^{n} t_i - \sum_{i=1}^{n}(i-1)t_i}.$$

В результате можно рассчитать число оставшихся в программе ошибок и среднюю наработку на отказ $T_{ср} = 1/\lambda$, т. е. получить оценку времени до обнаружения следующей ошибки.

В процессе отладки ИС, для повышения наработки на отказ от T_1 до T_2, необходимо обнаружить и устранить Δn ошибок. Величина Δn определяется соотношением:

$$\Delta n = N_0 T_0 \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right].$$

Выражение для определения затрат времени $\Delta\tau$ на проведение отладки, которые позволяют устранить Δn ошибок и, соответственно, повысить наработку на отказ от значения T_1 до T_2, имеет вид

$$\Delta\tau = \frac{N_0 T_0}{K} \ln\left(\frac{T_2}{T_1} \right).$$

Модель, учитывающая дискретно понижающуюся частоту появления ошибок [12] как линейную функцию времени тестирования и испытаний, построена на допущении о том, что частота проявления ошибок линейно зависит от времени испытания t_i между моментами обнаружения последовательных i-й и $(i-1)$-й ошибок:

$$\lambda(t_i) = K\left[N_0 - (i-1)\right] t_i,$$

где N_0 – начальное количество ошибок; K – коэффициент пропорциональности, обеспечивающий равенство единице площади под кривой вероятности обнаружения ошибок.

Для оценки наработки на отказ получается выражение, соответствующее распределению Релея:

$$P(t_i) = \exp\left\{ -K\left[N_0 - (i-1)\right] \frac{t_i^2}{2} \right\},$$

$$P(t_i) = P(T \ge t_i).$$

Отсюда плотность распределения времени наработки на отказ

$$f(t_i) = -P(t_i) = K\left[N_0 - (i-1)\right] t_i \exp\left\{ -K\left[N_0 - (i-1)\right] \frac{t_i^2}{2} \right\}.$$

Использовав функцию максимального правдоподобия, получим оценку для общего количества ошибок N_0 и коэффициента K:

$$N_0 = \left[\frac{2n}{K} + \sum_{i=1}^{n} (i-1) t_i^2 \right] \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} t_i^2},$$

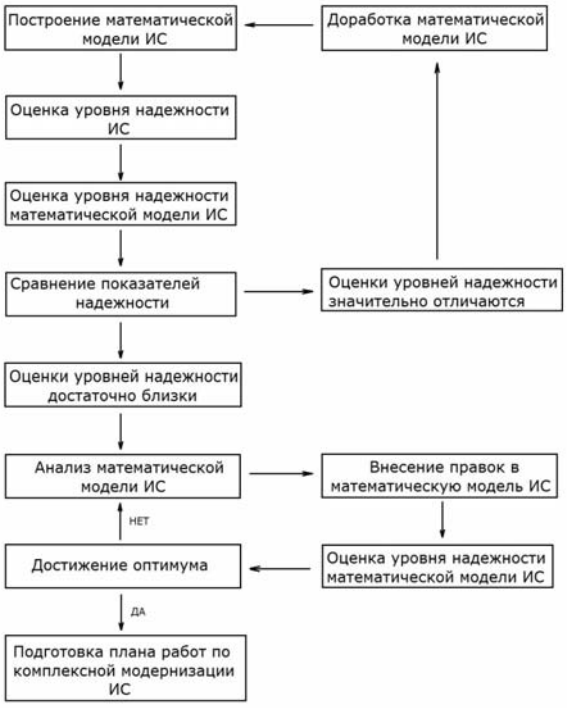
$$K = \left[\sum_{i=1}^{n} \frac{2}{N_0 - (i-1)} \right] \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} t_i^2}.$$

Таким образом, существует несколько подходов к решению вопроса повышения надежности ИС. Можно рассчитывать надежность ИС, тем самым определяя текущий уровень ее надежности, и планировать деятельность по ее повышению, действовать в условиях возникновения проблем и решения их по мере поступления, и возможно применение математического моделирования ИС для оценки вероятности возникновения ошибок в работе ИС. Как можно заметить, каждый из представленных методов решает собственную конкретную задачу, которая не решается в другом методе.

Традиционно представленные методы применяются отдельно друг от друга, при этом достижение наилучшего результата от применения различных подходов решения задачи часто заложено в применении комбинированной методики. Авторами статьи для решения поставленной задачи предложена схема применения описанных методов в рамках работы комбинированного алгоритма.

При построении комбинированной методики анализа надежности ИС авторами статьи были выбраны следующие математические методы:

– методы расчета показателей надежности ИС, в частности динамический метод;
– методы математического моделирования ИС;
– методы уменьшения наработки на отказ ИС;
– методы снижения интенсивности отказов ИС.



Блок-схема работы алгоритма

Эти методы на принципиальном уровне являются самостоятельными, однако существует возможность их объединения и построения их взаимодействия. Так, методы уменьшения наработки на отказ и снижения интенсивности отказов являются методами, направленными на решение уже выявленных проблем в работе ИС. Динамические методы расчета показателей надежности ИС лучше всего работают в условиях эксплуатации ИС, тем самым являясь хорошим индикатором уровня надежности ИС. Математическое моделирование используется для прогнозирования уровня надежности ИС в определенный момент времени, тем самым давая возможность выявить потенциальные места возникновения ошибок при эксплуатации ИС.

В результате комбинирования этих методик целесообразным становится их применение в определенной последовательности, а именно, на начальном этапе применяется математическое моделирование для прогнозирования уровня надежности и поиска мест возникновения ошибок, при этом процесс оценивания уровня надежности производится методом динамического анализа уровня надежности ИС, и как только на математической модели достигается оптимальное состояние уровня надежности ИС, можно применять прикладные методики уменьшения наработки на отказ и снижения интенсивности отказов ИС. Работа комбинированного алгоритма представлена в форме блок-схемы на рисунке.

Библиографические ссылки

1. Золотарев В. В., Лапина Е. В. Системы электронного документооборота : учеб. пособие. Красноярск : СибГАУ, 2012. 96 с.

2. Громов Ю. Ю. [и др.]. Надежность информационных систем : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2010. 160 с.

3. ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 2009.

4. Павлов И. В. Статистические методы оценки надежности сложных систем по результатам испытаний. М. : Радио и связь, 1982. 168 с.

5. Усенко О. А. Модели и методы оценки надежности программного обеспечения информационных систем : учеб. пособие. Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. 40 с.

6. Антонов А. В., Никулин М. С. Статистические модели в теории надежности : учеб. пособие. М. : Абрис, 2012. 390 с.

7. Карповский Е. Я. Надежность программной продукции. Киев : Техника, 1990. 160 с.

8. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем : монография. СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2007.

9. Кузнецов В. П. Интервальные статистические модели. М. : Радио и связь, 1991. 352 с.

10. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М. : Наука, 1978. 400 с.

11. Вилкас Э. И., Майминас Е. З. Решения: теория, информация, моделирование. М. : Радио и связь, 1981. 328 с.

12. Клейн Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. М. : Статистика, 1978. 335 с.

References

1. Zolotarev V. V., Lapina E. V. *Sistemy elektronnogo dokumentooborota: uchebnoe posobie* [Electronic document management systems]. Krasnoyarsk, SibGAU, Publ. 2012, 96 p.

2. Gromov Yu. Yu., Ivanova O. G., Mosyagina N. G., Nabatov K. A *Nadezhnost' informatsionnykh sistem: uchebnoe posobie* [Reliability of information systems]. Tambov, Izdatel'stvo TGTU, 2010, 160 p.

3. *GOST R 27.002–2009. Nadyezhnost v tehnike. Terminy i opredelyeniya.* [State Standard R 27.002–2009. Reliability in the sphere of inengineering. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2009.

4. Pavlov I. V. *Statisticheskie metody otsenki nadezhnosti slozhnykh sistem po rezul'tatam ispytaniy* [Statistical techniques of reliability assessment of difficult systems on test results]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, 168 p.

5. Usenko O. A. *Modeli i metody otsenki nadezhnosti programmnogo obespecheniya informatsionnykh sistem: uchebnoe posobie* [Models and valuation methods of reliability of the information systems software]. Taganrog, Izd-vo TTI YuFU, 2008, 40 p.

6. Antonov A. V., Nikulin M. S. *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti: uchebnoe posobie* [Statistical models in the reliability theory]. Moscow, Abris Publ., 2012, 390 p.

7. Karpovskiy E. Ya. *Nadezhnost' programmnoy produktsii* [Reliability of program production]. Kiev, Tekhnika, Publ. 1990, 160 p.

8. Ryabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem: monografiya* [Reliability and safety of structural and difficult systems]. St. Petersburg, Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2007.

9. Kuznetsov V. P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval statistical models]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991, 352 p.

10. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnykh system* [Simulation of difficult systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 400 p.

11. Vilkas E. I., Mayminas E. Z. *Resheniya: teoriya, informatsiya, modelirovanie* [Decisions: theory, information, simulation]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981. 328 p.

12. Kleyn, Dzh. *Statisticheskie metody v imitatsionnom modelirovanii* [Statistical techniques in simulation modeling]. Moscow, Statistica Publ., 1978, 335 p.

© Бычков С. С., Попов А. М., Золотарев В. В., 2014

УДК 517.55

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 48–54

ЗАДАЧА ГОЛЬДШТИКА О СКЛЕЙКЕ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ В ОСЕСИММЕТРИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ*

И. И. Вайнштейн, И. М. Федотова

Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, кор. УЛК
E-mail: web.ikit@sfu-kras.ru

Рассматривается осесимметрическая модель вихревых течений идеальной несжимаемой жидкости с разрывной нелинейной завихренностью. Предложенная модель является обобщением схемы Лаврентьева, описывающей плоские отрывные течения идеальной жидкости, на осесимметрический случай. В терминах функции тока решается краевая задача Дирихле для неоднородного эллиптического уравнения Эйлера–Пуассона–Дарбу с разрывной нелинейностью в правой части уравнения относительно решения. Рассматриваемая задача является обобщением известной задачи Гольдштика о склейке плоских вихревых и потенциальных течений идеальной жидкости на осесимметрический случай.

Показывается существование так называемого тривиального решения, которое соответствует потенциальному течению во всей области. На модельном примере (течение в шаре) устанавливается существование двух отличных от тривиального решений. Для общего случая задачи доказано существование нетривиального решения, показывающего существование рассматриваемого класса вихревых осесимметрических течений идеальной жидкости. В рассматриваемой модели считается, что стационарное течение идеальной жидкости является предельным течением вязкой жидкости при вязкости, стремящейся к нулю.

Ключевые слова: вихревые и потенциальные течения, завихренность, задача Гольдштика, тривиальное решение, функция Грина, интегральное уравнение.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 48–54

GOLDSHTIK'S PROBLEM OF PASTING OF VORTICAL CURRENTS OF AN IDEAL LIQUID IN THE AXIALLY SYMMETRIC CASE

I. I. Vainshtein, I. M. Fedotova

Institute of space and information technologies of Siberian Federal University
26, Kirenskogo St., ULK building, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: web.ikit@sfu-kras.ru

We consider that axially symmetric model of vortical flows of an ideal incompressible liquid with discontinuous nonlinear vorticity. The proposed model is a generalization of the Lavrentev's scheme planar separated flows of an ideal fluid for the axially symmetric case. In terms of the the flow function we solve the Dirichlet problem for the inhomogeneous elliptic Euler-Poisson-Darboux equation with discontinuous nonlinearity is relative to the decision in the right part of the equation. This problem is a generalization of the well-known problem of Goldshtik of pasting planar vortical and potential flows of an ideal liquid on the axially symmetric case.

The existence of the so-called trivial solution, which corresponds to the potential flows in the whole domain is shown. On a model example (flow in the ball) we establish the existence of two non-trivial solutions. For the general case of the problem we prove the existence of a nontrivial solution, indicating the existence of this class of axially symmetric vortical flows of an ideal liquid. In the model it is assumed that the stationary flow of an ideal liquid is a limiting flow of a viscous with viscosity tends to zero.

Keywords: vortical and potential flows, vorticity, Goldshtik's Problem, trivial decision, Green's function, integral equation.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2014 году (задание № 1.1462.2014/К).

Постановка задачи. Стационарное вихревое течение идеальной несжимаемой жидкости в плоском случае описывается уравнением

$$\frac{\partial^2\psi(x,y)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi(x,y)}{\partial y^2}=F(\psi), \qquad (1)$$

где завихренность $\omega=F(\psi)$; F – произвольная функция от ψ; $\psi(x,y)$ – функция тока; $V_x=\frac{\partial\psi}{\partial y}$, $V_y=-\frac{\partial\psi}{\partial x}$ – компоненты скорости, и в осесимметрическом случае при $rV_\varphi=\text{const}$ – уравнением

$$\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial z^2}+\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial r^2}-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi(z,r)}{\partial r}=F(\psi)r^2, \qquad (2)$$

где завихренность $\omega=F(\psi)r$; $r=\sqrt{x^2+y^2}$; $V_r=-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}$; $V_z=\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}$ [1]. В случае $\omega=0$ имеем потенциальное течение.

В работе изучаются вихревые потоки с зонами, имеющими различные завихренности, у которых общая граница – «нулевая» линия тока. Здесь не исключается возможность завихренности равняться нулю. В этом случае имеем задачу о склейке вихревых и потенциальных течений идеальной жидкости, впервые предложенной М. А. Лаврентьевым применительно к отрывным течениям [2].

Если стационарное течение идеальной жидкости считать как предельное течение вязкой жидкости при вязкости, стремящейся к нулю, то в области течения, ограниченной замкнутой линией тока, $F(\psi)=\text{const}$ [1].

Пусть D – ограниченная область с границей Γ, $\omega_1\ge 0,\ \omega_2\ge 0$. Следуя [2–4], рассмотрим задачи:

– в области D требуется найти непрерывно дифференцируемое решение уравнения

$$\Delta\psi(x,y)=\begin{cases}\omega_1, \text{ если } \psi<0,\\ -\omega_2, \text{ если } \psi>0,\end{cases} \qquad (3)$$

в плоском и осесимметрическом случае

$$\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial z^2}+\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial r^2}-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi(z,r)}{\partial r}=\begin{cases}\omega_1 r^2, \text{ если } \psi<0,\\ -\omega_2 r^2, \text{ если } \psi>0,\end{cases} \qquad (4)$$

при краевом условии

$$\psi\big|_\Gamma=\varphi(s)\ge 0. \qquad (5)$$

Рассмотрим задачу (3), (5) при $\omega_2=0$. Имеем задачу Гольдштика о склейке вихревых и потенциальных течений [1; 6]. Гармоническая функция $\psi_0(x,y)$, удовлетворяющая условию (5), положительна в области D и является решением уравнения (3). Это решение назовем тривиальным. Оно соответствует потенциальности течения во всей области.

В [1; 6] доказано существование нетривиального (с областью отрицательности) решения задачи (3), (5) при достаточно большом значении величины ω_1. В [4; 5] получено условие

$$\omega_1>\frac{4Ce}{R^2}, \qquad (6)$$

при котором существует нетривиальное решение задачи, где R – радиус наибольшего по площади круга, который можно вписать в область D; $C=\max\varphi(s)$. Если D – круг радиуса R и $\varphi(s)=C$, то при выполнении (6) задача (3), (5) имеет два нетривиальных решения [4]. Существование второго нетривиального решения задачи (3), (5) при $\omega_2=0$ доказано в [7; 8].

В работах [9–18] рассмотрены различные задачи о склейке вихревых и потенциальных течений, например, для неограниченной области или когда завихренность является произвольной функцией от функции тока. Задача (3), (5) при $\omega_1=0,\ \omega_2<0$ описывает течение идеальной жидкости в поле кориолисовых сил [1; 9; 14].

В общем случае задачи (3), (5) функция

$$\psi(x,y)=\psi_0(x,y)+\frac{\omega_2}{2\pi}\iint_D G(x,y,x_1,y_1)dx_1dy_1,$$

где $G(x,y,x_1,y_1)$ – функция Грина задачи Дирихле для уравнения Лапласа больше нуля во всей области D и тем самым является тривиальным решением задачи (3), (5). Это решение дает вихревое течение с постоянной завихренностью $-w_2$ во всей области течения.

Пусть B_1 – круг наибольшего радиуса R_1 такой, что $B_1\subseteq D$ (без ограничения общности можно считать, что его центр совпадает с началом координат), B_2 – круг наименьшего радиуса R_2 с центром в начале координат такой, что $B_2\supseteq D$. В [5] доказано, что при выполнении неравенства

$$w_1-\frac{w_2R_2^{\,2}}{R_1^{\,2}}eJ\,\frac{4Ce}{R_1^{\,2}}$$

задача (3), (5) имеет отличное от тривиального решение, что соответствует плоскому вихревому течению с разрывной кусочно-постоянной завихренностью.

Целью работы является исследование задачи (4), (5), описывающей вихревые осесимметрические течения идеальной жидкости с разрывной завихренностью.

Задача (4), (5). Тривиальное решение. Существование нетривиального решения. Пусть область D ограничена гладкой кривой σ, лежащей

в верхней полуплоскости $r>0$, и отрезком $[\alpha,\beta]$ оси z. Краевое условие (5) запишем в виде

$$\psi\big|_{\Gamma}=r^2\varphi(s)\ge 0. \qquad (7)$$

Непосредственной проверкой убеждаемся в справедливости равенства:

$$Lr^2\psi=r^2L^*\psi, \qquad (8)$$

$$L(\psi)=\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial z^2}+\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial r^2}-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi(z,r)}{\partial r},$$
$$L^*(\psi)=\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial z^2}+\frac{\partial^2\psi(z,r)}{\partial r^2}+\frac{3}{r}\frac{\partial\psi(z,r)}{\partial r}.$$

Будем искать решение задачи (4), (5) в виде $\psi=r^2u(z,r)$. В соответствии с (8) задача (4), (5) переформулируется в следующем виде: требуется найти непрерывно дифференцируемое в области D решение уравнения

$$\frac{\partial^2u(z,r)}{\partial z^2}+\frac{\partial^2u(z,r)}{\partial r^2}+\frac{3}{r}\frac{\partial u(z,r)}{\partial r}=\begin{cases}\omega_1, \text{ если } u<0,\\ -\omega_2, \text{ если } u>0,\end{cases} \qquad (9)$$

ограниченное при $r\to 0$, при краевом условии

$$u\big|_{\sigma}=\varphi(s)\ge 0. \qquad (10)$$

Пример. Пусть область D – полукруг $r^2+z^2\le R^2$ $(r>0)$, и условие (10) имеет вид

$$u\big|_{\sigma}=C\ge 0.$$

Это соответствует течению в шаре радиуса R.

Перейдем в уравнении (9) к полярным координатам и будем искать решение, зависящее только от ρ, $\rho^2=z^2+r^2$.

Имеем

$$\frac{\partial^2u(\rho)}{\partial\rho^2}+\frac{4}{\rho}\frac{\partial u(\rho)}{\partial\rho}=\begin{cases}\omega_1, & \text{если } 0\le\rho<a,\\ -\omega_2, & \text{если } a<\rho<R,\end{cases} \qquad (11)$$

и дополнительные условия

$$u(R)=C,\ u(a)=0,\ u'(a-0)=u'(a+0),$$
$$u(\rho) \text{ ограничена при } \rho\to 0. \qquad (12)$$

Функция

$$u(\rho)=\frac{w_2}{10}(R^2-r^2)+C$$

является тривиальным решением задачи. Ищем нетривиальные решения в виде

$$u(\rho)=\begin{cases}\dfrac{\omega_1}{10}(\rho^2-a^2), & \text{если } \rho\le a,\\ -\dfrac{\omega_2}{10}\rho^2+\dfrac{C_1}{\rho^3}+C_2, & \text{если } a\le\rho<R.\end{cases} \qquad (13)$$

Удовлетворяя дополнительным условиям (12), получаем уравнение для нахождения величины a:

$$(\omega_1+\omega_2)a^2(a^3-R^3)+15\left(C-\frac{\omega_2}{10}(a^2-R^2)\right)R^3=0.$$

Обозначим $x=\dfrac{a}{R}$, $0\le x\le 1$ и введем функцию

$$y(x)=x^2(x^3-1)+15\left(\frac{C\omega}{\omega_2R^2}-\frac{\omega}{10}(x^2-1)\right),\ \omega=\frac{\omega_2}{\omega_1+\omega_2}.$$

Исследуем функцию $y(x)$. Имеем

$$y(0)=15\left(\frac{C\omega}{\omega_2R^2}+\frac{\omega}{10}\right)>0,\quad y(1)=15\frac{C\omega}{\omega_2R^2}>0. \qquad (14)$$

Далее

$$y'(x)=5x^4-2x-3\omega x=0.$$

Отсюда $x_*=\sqrt[3]{\dfrac{2+3w}{5}}<1$ – корень полученного уравнения. Требуем $y(x_*)<0$. Это приводит к выполнению неравенства

$$\left(\frac{2\omega_1+5\omega_2}{5}\right)^5>\left(\frac{10C}{R^2}+\omega_2\right)^3(\omega_1+\omega_2)^2. \qquad (15)$$

Тогда с учетом (14) кривая $y(x)$ будет пересекать ось Ox на интервале (0,1) в двух точках x_1, x_2. Беря в (13) $a=Rx_1$ и $a=Rx_2$, получаем два нетривиальных решения.

Полагая в (15) $\omega_2=0$, получаем неравенство

$$\omega_1>25\left(\frac{5}{2}\right)^{\frac{2}{3}}\frac{C}{R^2}, \qquad (16)$$

выполнение которого дает условие существования двух нетривиальных решений, когда в одной из зон течение потенциально [4].

Целью дальнейшего исследования является нахождение условий, при которых задача (4), (5) имеет нетривиальное решение.

Существование нетривиального решения. Для оператора L^* известно фундаментальное решение [19]

$$E(z,r,z_1,r_1)=\frac{4}{\pi}\int_0^{\pi}\Big[(z-z_1)^2+r_1^2+ \\ +r^2-2r_1r\cos\beta\Big]^{-3/2}\sin^2\beta d\beta, \qquad (17)$$

которое как относительно z, r, так и z_1, r_1 при $z\ne z_1$, $r\ne r_1$ является решением уравнения

$$L^*E=0.$$

После замены $1+\cos\beta=t$

$$E=\frac{4}{\pi}\int_0^2[(z-z_1)+(r+r_1)-2rr_1t]^{-3/2}\sqrt{t(2-t)}dt=$$

$$=\frac{8}{\sqrt{\pi}}R_1^{-3}F\left(\frac{3}{2},\frac{3}{2},3;1-\sigma\right),$$

где $F(a,b,\gamma;c)$ – гипергеометрическая функция [20],

$$h=\frac{R^2}{R_1^2},$$

где $R^2=(z-z_1)^2+(z-z_1)^2$, $R_1^2=(z-z_1)^2+(z+z_1)^2$.

Принимая во внимание формулу [21]

$$F(a,b,a+b;1-h)=$$

$$=\Gamma(a+b)\Gamma^{-1}(a)\Gamma^{-1}(b)F(a,b,1,h)\ln h+\frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma^2(a)\Gamma^2(b)}\times$$

$$\times\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\Gamma(a+k)\Gamma(b+k)}{(k!)^2}[2\frac{\Gamma'(k+1)}{\Gamma(k+1)}-\frac{\Gamma'(a+k)}{\Gamma(a+k)}-\frac{\Gamma'(b+k)}{\Gamma(b+k)}]h^k,$$

получаем

$$E(z,r,z_1,r_1)=-\frac{2}{\pi}(rr_1)^{-\frac{3}{2}}\ln[(z-z_1)^2+$$

$$+r_1^2+r^2]+\bar{R}(z,r,z_1,r_1),$$

где $\bar{R}$ – регулярная в области D функция.

Будем предполагать, что кривая σ подходит к точкам α и β под углами, отличными от нуля и π соответственно. В [4; 20] для уравнения $L^*u=0$, с использованием фундаментального решения (17), введена функция Грина $G(r,z,r_1,z_1)$ ($G>0$ в области D) и доказано, что функция

$$V(z,r)=-\frac{1}{8}\iint_D f(z_1.r_1)r_1^3G(r,z,r_1,z_1)dz_1dr_1 \qquad (18)$$

внутри области D обладает свойствами аналогичными свойствам ньютоновского потенциала с логарифмитической особенностью на плоскости, на границе равняется нулю и непрерывна при $r_1\to 0$. Причем, если $f(z,r)$ ограничена и измерима в области D, то в любой подобласти $\bar{B}\subset D$ функция $V(z,r)$ имеет первые производные, удовлетворяющие условию Гельдера с константой Гельдера, зависящей только от $\max|f|$ и расстояния области B до границы области D. Если функция $f(z,r)$ удовлетворяет в области D условию Гельдера, то в D

$$L^*V=f(z,r).$$

Пусть функция $u_0(z,r)$ непрерывна в $\bar{D}$, в области D удовлетворяет уравнению

$$L^*u_0=0$$

и

$$u_0\big|_\sigma=\varphi(s)\ge 0.$$

Существование такой функции доказано в [22]. Там же доказано, что отличное от константы непрерывное в рассматриваемой области $\bar{D}$ решение уравнения $L^*u\ (z,r)=0$ максимальное и минимальное значение принимает только на σ. Отсюда следует, что $u_0>0$ в D.

Функция

$$u_*(z,r)=u_0(z,r)+\frac{\omega_2}{8}\iint_D r^3{}_1\ G(r,z,r_1,z_1)dr_1dz_1 \qquad (19)$$

в области D положительна, удовлетворяет уравнению $L^*u_*(z,r)=-\omega_2$ и тем самым является тривиальным решением рассматриваемой задачи (9), (10). Это соответствует вихревому течению во всей области с одной постоянной завихренностью $-\omega_2$.

Для нахождения нетривиального решения рассмотрим последовательность вспомогательных задач

$$L^*u_n=\begin{cases}\omega_1,\ (r,z)\in B_a,\\ \frac{\omega_1}{2}(1-th(u_n\cdot n))-\frac{\omega_2}{2}(1+th(u_n\cdot n)),\ (r,z)\in D\setminus\bar{B}_a\end{cases} \qquad (20)$$

при краевом условии

$$u_n\big|_\sigma=\varphi(s), \qquad (21)$$

где B_a – полукруг $r^2+z^2\le a^2$ $(r>0)$, $B_a\subset D$.

Задача (19), (20) эквивалентна интегральному уравнению

$$u_n(z,r)=u_0(z,r)-\frac{\omega_1}{8}\iint_{B_a}r_1^3G(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1-$$

$$-\frac{1}{8}\iint_{D\setminus B_a}r_1^3(\frac{\omega_1}{2}(1-th(\psi_n\cdot n))- \qquad (22)$$

$$-\frac{\omega_2}{2}(1+th(\psi_n\cdot n)))G(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1.$$

Исходя из указанных свойств интеграла (18), следуя [1; 3], заключаем (используя теорему Шаудера), что интегральное уравнение (22) в области $D\setminus\bar{B}_a$ при каждом n имеет решение. Подставляя это решение в правую часть уравнения (22), определяем функцию $u_n(z,r)$ во всей области D. Полученная функция – решение задачи (20), (21). Учитывая еще раз свойства интеграла (18) и применяя теорему Арцелла, устанавливаем компактность последовательности $u_n(z,r)$ в пространстве непрерывно дифференцируемых в области D функций. Пусть подпоследовательность $u_{n_k}(z,r)$ сходится к непрерывно дифференцируемой функции u^*. Учитывая

$$\lim_{n_k\to\infty}\frac{1}{2}(1-th(u_{n_k}\cdot n_k))=\begin{cases}1,\ \text{если}\ u(z,r)<0,\\ 0,\ \text{если}\ u(z,r)>0,\end{cases}$$

получаем, что правая часть уравнения (21) в пределе совпадает с правой частью уравнения (9). Далее, аналогично [1; 4; 9], устанавливаем, что предельная функция является непрерывно дифференцируемым решением задачи

$$\frac{\partial^2 u^*(z,r)}{\partial z^2}+\frac{\partial^2 u^*(z,r)}{\partial r^2}+\frac{3}{r}\frac{\partial u^*(z,r)}{\partial r}= \\ =\begin{cases}\omega_1, \text{ если } (r,z)\in B_a,\\ -\omega_2, \text{ если } (r,z)\in D\setminus \overline{B}_a,\end{cases} \tag{23}$$

$$u^*\big|_\sigma=\varphi(s).$$

Подберем полукруг B_a в (23) так, чтобы полученная функция u^* была в нем отрицательна. Тогда она будет искомым нетривиальным решением рассматриваемой задачи.

Пусть B_1 – полукруг $r^2+z^2<R_1{}^2,\ r>0,$ наибольшего радиуса R_1 такой, что $B_1\subseteq D$ (без ограничения общности можно считать, что его центр совпадает с началом координат), B_2 – полукруг $r^2+z^2<R_2{}^2,\ r>0,$ наименьшего радиуса R_2 с центром в начале координат такой, что $B_2\supseteq D$ и $G_{B_1},\ G_{B_2}$ – функции Грина для областей $B_1,\ B_2$ соответственно.

Рассмотрим функции

$$V_1(z,r)=\iint\limits_{B_a} r_1^3 G(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1- \\ -\iint\limits_{B_a} r_1^3 G_{B_1}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1,\ \ (z,r)\in B_1,$$

$$V_2(z,r)=\iint\limits_{D} r_1^3 G(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1- \\ -\iint\limits_{B_2} r_1^3 G_{B_2}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1,\ \ (z,r)\in D.$$

Пусть B_a – полукруг $z^2+r^2<a^2,\ 0<a<R_1$. Тогда

$$L^*V_1=0,\ \ (z,r)\in B_1,$$

$$L^*V_2=0,\ \ (z,r)\in D,$$

$$V_1\big|_{\sigma_1}>0,\ V_2\big|_\sigma<0.$$

Отсюда и из принципа экстремума для уравнения $L^*V(z,r)=0$ следует

$$-\iint\limits_{B_a} r_1^3 G(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1< \\ <-\iint\limits_{B_a} r_1^3 G_{B_1}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1,\ (r,z)\in B_1,$$

$$\iint\limits_{D} r_1^3 G(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1< \\ <\iint\limits_{B_2} r_1^3 G_{B_2}\ (z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1,\ (r,z)\in D.$$

Применяя полученные неравенства в (22) $((z,r)\in B_1)$, получаем

$$u_n(z,r)\le u_0(z,r)-\frac{\omega_1}{8}\iint\limits_{B_a} r_1^3 G_{B_1}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1+ \\ +\frac{\omega_2}{8}\iint\limits_{D} r_1^3 G(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1\le \\ \le C-\frac{\omega_1}{8}\iint\limits_{B_a} r_1^3 G_{B_1}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1+ \\ +\frac{\omega_2}{8}\iint\limits_{B_2} r_1^3 G_{B_2}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1\le \\ \le C+\frac{\omega_2 R_2{}^2}{5}-\frac{\omega_1}{8}\iint\limits_{B_a} r_1^3 G_{B_1}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1. \tag{24}$$

Обозначим

$$v(z,r)=C+\frac{\omega_2 R_2{}^2}{5}-\frac{\omega_1}{8}\iint\limits_{B_a} r_1^3 G_{B_1}(z,r,z_1,r_1)dz_1dr_1. \tag{25}$$

Подберем полукруг B_a в (25) так, чтобы функция $v(z,r)$ на его границе равнялась нулю. Тогда она будет в B_a меньше нуля, а в $B_1\setminus B_a$ – больше нуля. В этом случае она является решением частного случая задачи, рассмотренной в примере, если положить $\omega_2=0$, а граничное условие взять

$$v\big|_{\sigma_1}=C+\frac{\omega_2 R_2{}^2}{5}.$$

Для этого случая условие (16) существования требуемого полукруга B_a принимает вид

$$\omega_1>25\left(\frac{5}{2}\right)^{2/3}\left(\frac{C}{R_2{}^2}+\frac{\omega_2}{5}\right). \tag{26}$$

Пусть выполнено неравенство (26). Учитывая, что $u^*<\nu$ при $(z,r)\in B_1$, заключаем, что полученное решение u^* меньше нуля в полукруге B_a, а это значит, что оно является отличным от тривиального решением рассматриваемой задачи.

Таким образом, установлено, что при выполнении неравенства (26) существуют осесимметрические вихревые течения с разрывными завихренностями, и такие течения обладают эффектом неединственности.

Замечание. Если в плоском случае вихревое течение идеальной жидкости описывается уравнением (1), то осесимметрическое течение в общем случае – уравнением

$$L\psi=r^2F(\psi)-\Gamma(\psi)\Gamma'(\psi),$$

где $F(\psi)$ и $\Gamma(\psi)$ – произвольные функции от ψ,

$$V_r=-\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z},\ V_z=\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r},\ rV_\varphi=\Gamma(\psi).$$

Вопрос об определении функций $F(\psi)$ и $\Gamma(\psi)$ рассмотрен в [1]. Как указывалось выше, одним из подходов их определения является рассмотрение течения идеальной жидкости как предельного

значения вязкой, при стремлении вязкости к нулю. В этом случае $F(\psi)$ и $\Gamma(\psi)$ являются константами. В общем случае функции $F(\psi)$ и $\Gamma(\psi)$ должны быть заданы исходя из граничных условий. Задача, рассматриваемая в настоящей работе, соответствует случаю, когда $F(\psi)$ и $\Gamma(\psi)$ равны константам.

Библиографические ссылки

1. Гольдштик М. А. Вихревые потоки. Новосибирск : Наука, 1981. 365 с.

2. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М. : Наука, 1973. 416 с.

3. Вайнштейн И. И. Об одной краевой задаче вихревых и потенциальных течений идеальной жидкости в осесимметрическом случае // Дифференциальные уравнения. 1970. Т. 6. № 1. С. 109–122.

4. Вайнштейн И. И. Движение идеальной жидкости с завихренными зонами : дис. … канд. физ.-мат. наук . Новосибирск, 1972. 125 с.

5. Вайнштейн И. И., Юровский В. К. Об одной задаче сопряжения вихревых течений идеальной жидкости // Журн. прикл. мех. и техн. физ. 1976. № 5. С. 98–100.

6. Гольдштик М. А. Математическая модель отрывных течений несжимаемой жидкости // Докл. АН СССР. 1962. Т. 147, № 6. С. 1310–1313.

7. Вайнштейн И. И. Решение двух дуальных задач о склейке вихревых и потенциальных течений вариационным методом М. А. Гольдштика // Журн. СФУ. Сер. Матем. и физ. 2011. № 4(3). С. 320–331.

8. Потапов Д. К. О числе решений для одного класса уравнений эллиптического типа со спектральным параметром и разрывной нелинейностью // Дальневост. матем. журн. 2012. Т. 12, № 1. С. 86–88.

9. Вайнштейн И. И., Гольдштик М. А. О движении идеальной жидкости в поле кориолисовых сил // Докл. АН СССР. 1967. Т.173, № 6. С. 1277–1280.

10. Шабат А. Б. Об одной схеме плоского движения жидкости при наличии на дне траншеи // Журн. прикл. мех. и техн. физ. 1962. № 4. С. 68–80.

11. Шабат А. Б. О двух задачах на склеивание // Докл. АН СССР. 1963. Т. 150. № 6. С. 1242–1245.

12. Антонцев С. Н., Лелюх В. Д. Некоторые задачи сопряжения вихревых и потенциальных дозвуковых течений // Динамика сплошной среды. Новосибирск. 1969. Вып. 1. С. 134–153.

13. Плотников П. И. О разрешимости одного класса задач на склеивание потенциального и вихревого течений // Динамика сплошной среды. Новосибирск, 1969. Вып. 3. С. 61–69.

14. Вайнштейн И. И. Дуальная задача к задаче М. А. Гольдштика с произвольной завихренностью // Журн. СФУ. Сер. Матем. и физ. 2010. № 3(4). С. 500–506.

15. Вайнштейн И. И., Федотова И. М. Дуальная задача к задаче М. А. Гольдштика с неограниченной завихренностью // Журн. СФУ. Сер. Матем. и физ. 2012. № 5(4). С. 515–526.

16. Вайнштейн И. И., Литвинов П. С. Модель М. А. Лаврентьева о склейке вихревых и потенциальных течений из жидкости // Вестник СибГАУ. 2009. № 3(24). С. 7–9.

17. Васин А. В., Тимофеева О. А. Нахождение линии раздела областей с потенциальным и вихревым течением // Журнал Университета водных коммуникаций. 2012. Вып. 2 (14). С. 8–13.

18. Потапов Д. К. О решениях задачи Гольдштика // Сиб. журн. вычисл. матем. 2012. 15(4). С. 409–415.

19. Терсенов С. А. Введение в теорию уравнений, вырождающихся на границе. Новосибирск, 1973. 144 с.

20. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблица интегралов, сумм, рядов и произведений. М. : Физматгиз,1963. 1100 с.

21. Лебедев Н. Н. Специальные функции и их приложения. М. : Гостехиздат, 1953. 190 с.

22. Кароль И. Л. К теории краевых задач для уравнений смешанного эллиптико-гиперболического типа // Матем. сб. 1956. Т. 38(80), № 3. С. 261–282.

References

1. Gol'dshtik M. A. *Vihrevye potoki* [Vortex flows]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, 365 p.

2. Lavrent'ev M. A., Shabat B. V. *Problemy gidrodinamiki i ih matematicheskie modeli* [Problems of hydrodynamics and their mathematical models]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 416 p.

3. Vainshtein I. I. [On a boundary problem of vortex and potential flows of an ideal fluid in the axially symmetric case]. *Differentsial'nye uravneniya.* 1970, vol. 6, no. 1, p. 109–122. (In Russ.)

4. Vainshtein I. I. *Dvizhenie ideal'noy zhidkosti s zavihrennymi zonami: dis…. kand. fiz.-mat. nauk* [Motion of ideal fluid with vorticity zones: Diss. on competition of a scientific degree of the candidate of phys. and math. sci.]. Novosibirsk, 1972, 125 p.

5. Vainshtein I. I., Yurovskiy V. K. [On a problem of conjugation of vortical flows of ideal fluid]. *Zhurn. prikl. meh. i tehn. fiz*. 1976, no. 5, p. 98–100. (In Russ.)

6. Gol'dshtik M. A. [Mathematical model of separated flows of an incompressible fluid]. *Dokl. AN SSSR.* 1962, vol. 147, no. 6, p. 1310–1313. (In Russ.)

7. Vainshtein I. I. [Solution of two dual problems of gluing eddy currents and potential variational M. A. Goldshtik's method]. *Zhurn. SFU. Ser. Matem. i fiz*. 2011, 4(3), p. 320–331. (In Russ.)

8. Potapov D. K. [The number of solutions for a class of elliptic equations with a spectral parameter and discontinuous nonlinearity]. *Dal'nevost. matem. zhurn*. 2012, vol. 12, no. 1, p. 86–88. (In Russ.)

9. Vainshtein I. I., Gol'dshtik M. A. [On the motion of an ideal fluid in the Coriolis forces]. *Dokl. AN USSR*. 1967, vol. 173, no 6, p. 1277–1280. (In Russ.)

10. Shabat A. B. [A scheme for plane motion in the presence of liquid at the bottom of the trench]. *Zhurn. prikl. meh. i tehn. fiz.* 1962, no. 4, p. 68–80. (In Russ.)

11. Shabat A. B. [Two problems pasting]. *Dokl. AN SSSR.* 1963, vol. 150, no. 6, p. 1242–1245. (In Russ.)

12. Antontsev S. N., Lelyuh V. D. [Some problems of conjugation of vortex and potential subsonic flows]. *Dinamika sploshnoy sredy.* Novosibirsk, 1969, vol. 1, p. 134–153. (In Russ.)

13. Plotnikov P. I. [On the solvability of a class on the gluing of potential and vortex flows]. *Dinamika sploshnoy sredy.* Novosibirsk, 1969, vol. 3, p. 61–69. (In Russ.)

14. Vainshtein I. I. [The dual problem to M. A. Goldshtik with arbitrary vorticity]. *Zhurn. SFU. Ser. Matem. i fiz.* 2010, no. 3(4), p. 500–506 (In Russ.)

15. Vainshtein I. I., Fedotova I. M. [The dual problem to M. A. Goldshtik with unlimited vorticity]. *Zhurn. SFU. Ser. Matem. i fiz.* 2012, no. 5(4), p. 515–526. (In Russ.)

16. Vainshtein I. I., Litvinov P. S. [Model to M.A. Lavrentiev about gluing of vortex and potential flows of liquid]. *Vestnik SibGAU.* 2009, vol. 24, no. 3, p. 7–9. (In Russ.)

17. Vasin A. V., Timofeeva O. A. [Finding the line of domains with the potential and vortex flow]. *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikatsiy*. 2012, vol. 2 (14), p. 8–13. (In Russ.)

18. Potapov D. K. [About Solutions of Problem to Goldshtik]. *Sib. zhurn. vychisl. matem*. 2012, no. 15(4), p. 409–415. (In Russ.)

19. Tersenov S. A. *Vvedenie v teoriyu uravneniy vyrozhdayuschihsya na granitse* [Introduction to the theory of equations degenerating on the boundary]. Novosibirsk, 1973. 144 p.

20. Gradshtein I. S., Ryzhik I. M. *Tablitsa integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Table of integrals, series and products]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 1100 p.

21. Lebedev N. N. *Spetsial'nye funktsii i ih prilozheniya* [Special functions and their applications]. Moscow, Gostehizdat Publ., 1953, 190 p.

22. Karol' I. L. [On the theory of boundary value problems for equations of mixed elliptic-hyperbolic type]. *Matem. sb.* 1956, vol. 38(80), no. 3, p. 261–282. (In Russ.)

© Вайнштейн И. И., Федотова И. М., 2014

УДК 62-501.6

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 55–62

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Н. Д. Демиденко[1], Л. В. Кулагина[2]

[1]Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра
Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: klvation@gmail.com

Рассмотрена задача моделирования и оптимального управления ректификационными установками, состоящими из технологических печей и ректификационных колонн. Такая сложная система исследуется как система с распределенными параметрами, поскольку для описания статических и динамических режимов применяется математический аппарат дифференциальных уравнений в частных производных. Обычно в научной литературе излагаются результаты исследований режимов работы отдельных аппаратов. Исследований установок, содержащих несколько объектов с различными технологическими процессами, значительно меньше в связи со сложным математическим описанием и громоздкими вычислениями. Решений задач по оптимальному управлению такими сложными установками еще меньше.

Используя феноменологический подход, построена математическая модель тепловых процессов в технологических печах и процессов разделения многокомпонентных смесей в ректификационных колоннах. Модель содержит уравнения в частных производных для процессов теплообмена, массообмена и гидродинамики течения дымовых газов в технологической печи и уравнения массопередачи в ректификационной колонне. В связи с тем, что процессы происходят с рециркуляцией взаимодействующих потоков, граничные условия процесса массообмена в ректификационных колоннах содержат уравнения с обыкновенными производными. Эти условия заданы на разных концах аппаратов. Для расчета оптимальных режимов установки сформулирована задача оптимального управления качеством целевого продукта и получены необходимые условия оптимальности. Поскольку управляющие функции входят в основные граничные уравнения, вариации управлений в области и на границе не являются независимыми, что отражается на структуре сопряженной задачи. При этом используется аргументация вариационного исчисления. Необходимые условия оптимальности содержат исходную краевую задачу, сопряженную относительно функций Лагранжа.

Решение исходной и краевой задач позволяет определить оптимальное управление и параметры технологического процесса. Приведены численные результаты с управляющим потоком сырья в дебутанизаторе установки сернокислотного алкилирования изобутана бутиленами. Для этого разработан численный алгоритм. Особенностью разработанного алгоритма является решение задач с граничными условиями для некоторых параметров на противоположных концах области. Кроме того, функции Лагранжа сопряженной системы заданы в конечный момент времени. Рассчитаны оптимальные показатели массообменного процесса: концентрации целевого продукта в дефлегматоре и в кубе.

Ключевые слова: математическое моделирование, системы с распределенными параметрами, оптимальное управление, тепломассообмен.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 55–62

SIMULATION AND OPTIMISATION IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETRES

N. D. Demidenko[1], L. V. Kulagina[2]

[1]Special Design and Technological Bureau “Nauka” Krasnoyarsk Scientific Centre
of Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
50, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny prosp., 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation
E-mail: klvation@gmail.com

The article presents a method of simulation and optimal control for rectification plants, containing technological furnaces and rectification columns. This complicated system is shown as a system with distributed parameters, as for static and dynamic modes simulation a mathematical formalism of differential equations in partial differential was applied. As a rule scientific literature deals with operation modes outcomes for single plants. Due to complicated mathematical formalism and computation investigations dealing with a number of objects with distributed parameters are infrequently. The optimal control tasks solutions for complicated plants are poorly shown in scientific literature A phenomenological approach was applied for mathematical model of heat processes in technological furnaces and separation processes in multicomponent mixtures for rectification columns. The model contains partial differential equitations for heat- and mass-exchange processes and hydrodynamics for flue gas flows in technological furnace and mass-exchange equitations for rectification column. Described processes occurs with recirculation flow interaction and heat-exchange processes' boundary conditions for rectification columns are described in ordinary derivatives. The conditions are given at the opposite ends of the plant. The optimal control modes solutions were formulated an optimal control task for desired product and necessary conditions for optimality. Due control functions are included in the main boundary derivatives, control variations in the range and on the boundary are dependent, this works on dual problem structure. Arguments of variational calculus was applied. Necessary conditions for optimality are containing original boundary-value problem conjugated relatively to the Lagrangians. Original and boundary tasks solution determines optimal control and technological processes parameters. The article gives numerical outcomes with control of flow of raw materials in debutanizer plant for sulfuric acid alkylation of isobutane with butenes. A numeric algorithm was worked out. The peculiarity of the algorithm is solving a boundary conditions tasks for some parameters at the opposite ends of the area. Moreover Lagrangians for conjugated system are given at a finite time. Optimal characteristics of heat-exchange process of desired product in the dephlagmator and cube were obtained.

Keywords: mathematical modeling, systems with distributed parameters, optimal control, heat-and-mass exchange.

Введение. На нефтеперерабатывающих заводах ведется переработка нефти в бензин, керосин, мазут, смазочные масла, сырье для нефтехимии и т. д. Переработка осуществляется в технологических установках для первичной переработки, каталитического риформинга, каталитического крекинга и т. д. Основными аппаратами установок являются трубчатые печи, ректификационные колонны и др. Основу работы этих аппаратов составляют процессы теплообмена, массообмена и гидродинамики взаимодействующих потоков. Анализ процессов и проектирование эффективных режимов рассматриваемых объектов химической технологии с целью создания автоматизированных систем контроля и управления является важнейшей проблемой современного производства.

Математические методы и вычислительные средства позволяют осуществить процесс моделирования и оптимизации сложных технологических установок, включающих технологические печи, ректификационные колонны и др. Для описания таких процессов всей установки возможна математическая модель всей цепочки. На рис. 1 приведена принципиальная схема подобной установки. Опыт исследования отдельных аппаратов уже накоплен достаточный, и возможен подход к исследованию установки в целом. В работе исследуемые объекты химической технологии рассматриваются как объекты с распределенными параметрами, для описания которых применяется математический аппарат дифференциальных уравнений в частных производных. Для анализа статических и динамических режимов и решения задач оптимального управления формулируются соответствующие краевые задачи.

Ректификационная установка состоит из технологической печи и ректификационных колонн. Трубчатые печи разных конструкций широко распространены в нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической и других отраслях промышленности, являются составной частью многих установок и применяются в различных технологических процессах (перегонка нефти и мазута, пиролиз, каталитический крекинг, очистка масел и др.). В печи сырье нагревается до требуемой температуры и подается в среднюю часть колонны для разделения смеси на компоненты.

Трубчатая печь имеет камеры радиации и конвекции (рис. 1). В камере радиации (топочной камере), где сжигается топливо, размещена радиантная поверхность (экран), поглощающая лучистое тепло в основном за счет радиации. В камере конвекции расположены конвекционные трубы, воспринимающие тепло, главным образом, при соприкосновении дымовых газов с поверхностью нагрева труб конвекции.

Уравнения процессов в технологической печи. При исследовании процесса горения капель жидкого топлива в воздухе в основном представляет интерес распределение концентраций компонентов, плотности, температуры сырья, температуры и скорости дымовых газов в печи при статических и динамических режимах работы. Исходя из одномерности движения потока, математическая модель нестационарного горения может быть представлена следующими уравнениями [1]:

1. Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial \ell} = 0, \qquad (1)$$

где ρ – массовая плотность смеси, u – скорость движения смеси.

Для покомпонентной модели процесса горения уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{\partial (\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho x u)}{\partial \ell} = -\frac{\rho x}{\tau}, \qquad (2)$$

где ℓ – линейный размер; x – концентрация горючего вещества в смеси ($0 \le x \le 1$); τ – время сгорания.

2. Уравнение движения в виде

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial \ell}\right)+\frac{\partial P}{\partial \ell}=0, \qquad (3)$$

где P – давление.

3. Уравнение сохранения энергии

$$\rho T_{\Pi}\left(\frac{\partial S}{\partial t}+u\frac{\partial S}{\partial \ell}\right)=\frac{\rho x}{\tau}q-Q\left(T_{\Pi}\right)+$$

$$+K_1\left(T_c^1-T_{\Pi}\right)+K_1\left(T_c^2-T_{\Pi}\right), \qquad (4)$$

где q – теплота сгорания топлива; T_{Π} – температура дымовых газов; $Q(T_{\Pi})$ – потери на излучение; T_c^1, T_c^2 – температура нагреваемого сырья, движущегося в нижнем и верхнем направлении; K_1 – коэффициент теплопередачи; S – энтропия, причем $S=c_v\ln\frac{P}{\rho^{\gamma}}\left(\gamma=1-1,4\right)$.

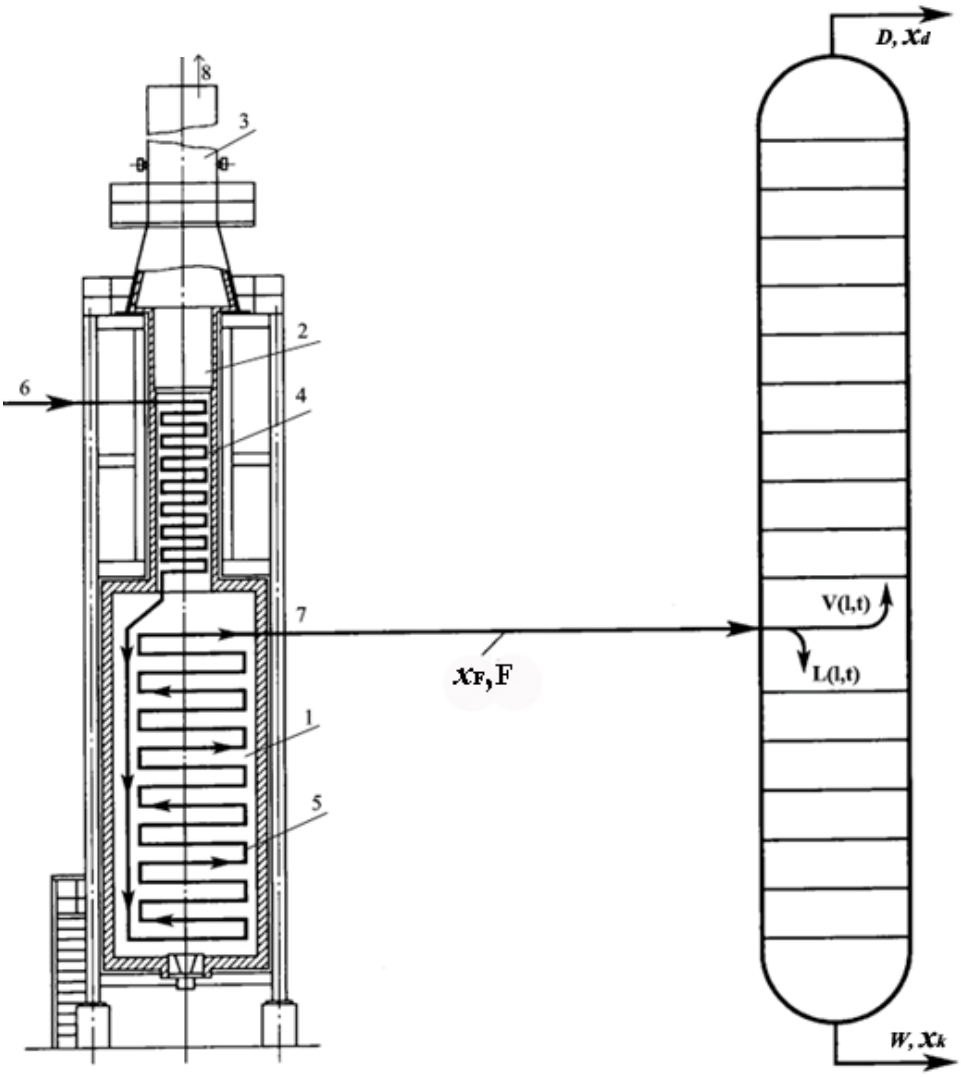
4. Уравнение теплообмена между нагреваемым сырьем, движущимся в низ и верх печи, и дымовыми газами можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial T_c^1}{\partial t}-w\frac{\partial T_c^1}{\partial \ell}=K_2\left(T_{\Pi}-T_c^1\right)-Q(T_{\Pi}); \qquad (5)$$

$$\frac{\partial T_c^2}{\partial t}+w\frac{\partial T_c^2}{\partial \ell}=K_2\left(T_{\Pi}-T_c^2\right)-Q(T_{\Pi}), \qquad (6)$$

K_2 – коэффициент теплопередачи; w – скорость течения сырья.

Для постановки краевой задачи необходимо задать неизвестные параметры в начальный момент времени и на границе объекта.



а *б*

Рис. 1. Схема ректификационной установки: *а* – технологическая печь; *б* – ректификационная колонна; *1* – камера радиации (топочная камера); *2* – камера конвекции; *3* – дымовая труба; *4* – конвекционные трубы; 5 – радиантные трубы; 6 – вход сырья; *7* – выход сырья; *8* – дымовые газы

Начальные условия:

$$\rho(\ell,0)=\rho_0, x(\ell,0)=x_0, u(\ell,0)=u_0,$$
$$T_{\Pi}(\ell,0)=T_{\Pi 0}, T_c^1(\ell,0)=T_{c0}^1, T_c^2(\ell,0)=T_{c0}^2. \quad (7)$$

Граничные условия:

$$\rho(0,t)=\alpha_1, x(0,t)=\alpha_2, u(0,t)=\alpha_3,$$
$$T_{\Pi}(0,t)=\alpha_4, T_c^1(L,t)=\alpha_5, T_c^2(0,t)=T_c^1(0,t)=\alpha_6, \quad (8)$$

где L – длина печи.

На базе системы (1)-(8) можно сформулировать и решить задачи оптимального управления с различными управляющими параметрами [2-6].

Расчет динамических режимов трубчатых печей. Рассмотрим следующую тепломассообменную задачу для процессов в трубчатой печи. Для этого приведем систему (1)–(6) к следующему виду:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\rho}{\partial t}=-u\dfrac{\partial\rho}{\partial\ell}-\rho\dfrac{\partial u}{\partial\ell}, \\ \dfrac{\partial x}{\partial t}=-u\dfrac{\partial x}{\partial\ell}-\dfrac{x}{\tau}, \\ \dfrac{\partial u}{\partial t}=-u\dfrac{\partial u}{\partial\ell}-R\dfrac{\partial T_{\Pi}}{\partial\ell}-\dfrac{RT_{\Pi}}{\rho}\dfrac{\partial\rho}{\partial\ell}, \\ \dfrac{\partial T_{\Pi}}{\partial t}=(1-\gamma)T_{\Pi}\dfrac{\partial u}{\partial\ell}-u\dfrac{\partial T_{\Pi}}{\partial\ell}+ \\ +\dfrac{x}{C_v\tau}q-\dfrac{Q\left(T_{\Pi},T_c^1,T_c^2\right)}{C_v\rho}+ \\ +K_1\left(T_c^1-T_{\Pi}\right)+K_1\left(T_c^2-T_{\Pi}\right), \\ \dfrac{\partial T_c^1}{\partial t}=w\dfrac{\partial T_c^1}{\partial\ell}+K_2\left(T_{\Pi}-T_C^1\right)- \\ -Q\left(T_{\Pi}\right), \quad t\in[0,T], \quad \ell\in[0,L], \\ \dfrac{\partial T_c^2}{\partial t}=-w\dfrac{\partial T_c^2}{\partial\ell}+K_2\left(T_{\Pi}-T_C^2\right)- \\ -Q\left(T_{\Pi}\right), \quad t\in[0,T], \quad \ell\in[0,L_1], \end{cases} \quad (9)$$

где L_1 – точка вывода сырья из печи. Таким образом, сформулирована краевая задача (7)–(9). Здесь температура сырья T_c^1 задается в точке $\ell = L$, так как сырье подается сверху в печь, и таким образом мы имеем противоточный технологический процесс.

Кривые разгона на выходе печи получены при возмущении на ± 20 % с шагом 5 % на входе печи по температуре сырья и по температуре дымовых газов (рис. 2–5).

Кривые переходных процессов для плотности, скорости, температуры потока дымовых газов и температуры сырья используются при решении задач локальной автоматики промышленных установок.

Необходимые условия оптимальности в задаче управления объектами с рециркуляцией взаимодействующих потоков. Рассмотрим задачу оптимального управления расходом сырья F в ректификационной колонне.

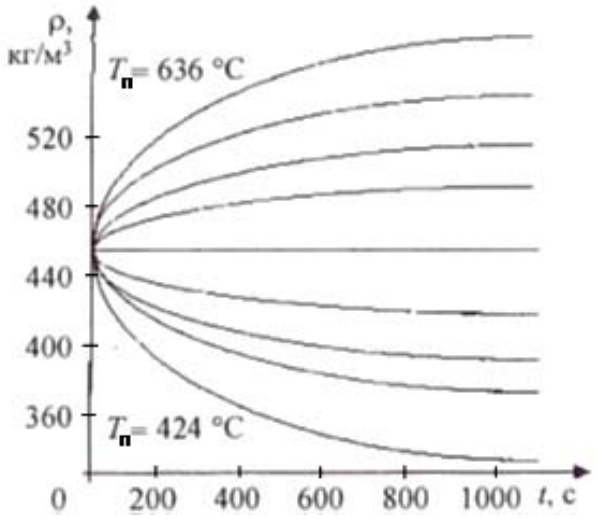


Рис. 2. Кривые разгона по плотности потока в зависимости от температуры потока (от 424 до 636 °C)

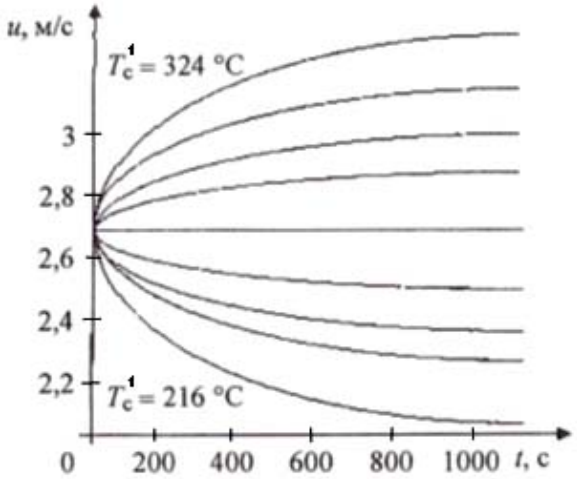


Рис. 3. Кривые разгона по скорости потока дымовых газов в зависимости от температуры сырья (от 216 до 324 °C)

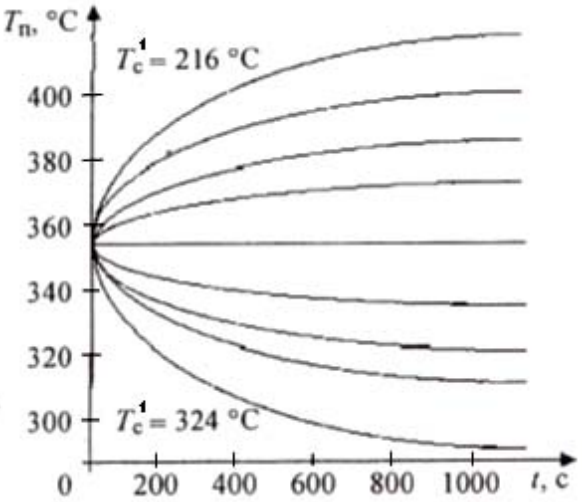


Рис. 4. Кривые разгона по температуре дымовых газов в зависимости от температуры сырья (от 216 до 324 °C)

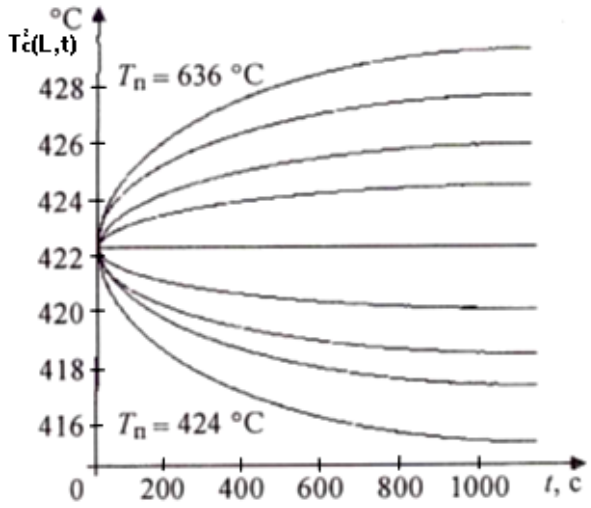


Рис. 5. Кривые разгона по температуре сырья в зависимости от температуры потока газов (от 424 до 636 °C)

Для получения необходимых условий оптимальности (условий стационарности) используются методы классического вариационного исчисления [5–15]. Управления предполагаются кусочно-непрерывными, а соответствующие им решения – непрерывными и кусочно-гладкими.

Здесь рассматривается следующая модель процесса [16]:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial(H_x x)}{\partial t}-\frac{\partial(Lx)}{\partial \ell}=k\left(y-y^*(x)\right)+F(t)\Phi_x(\ell)x_F,\\&\frac{\partial(H_y y)}{\partial t}-\frac{\partial(Vy)}{\partial \ell}=k\left(y^*(x)-y\right),\ 0<t<T,\ 0<\ell<L.\end{aligned}\qquad(10)$$

Краевые условия: при $\ell = 0$

$$\frac{\mathrm{d}\left(H_{x_k}x_k\right)}{\mathrm{d}t}=L(0,t)x(0,t)-V(0,t)y(0,t)-Wx_k(t),\qquad(11)$$

$$y(0,t)=a\left[y_k^*(x_k)-x_k(t)\right]+x_k(t),\ \text{при } \ell=L$$

$$\begin{aligned}&\frac{\mathrm{d}\left(H_{x_d}x_d\right)}{\mathrm{d}t}=V_d(t)y_d(t)-\left(L_d(t)+D(t)\right)x_d(t),\\&V_d y_d(t)-V(L,t)y(L,t)=L_d x_d(t)-L(L,t)x(L,t),\qquad(12)\\&y_d(t)=y(L,t)+E_d\left[y_d^*(x_d)-x(L,t)\right].\end{aligned}$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned}&x(\ell,0)=x_0(\ell),\quad y(\ell,0)=y_0(\ell),\quad 0<\ell<1,\\&x_d(0)=x_{d0},\quad x_k(0)=x_{k0},\quad 0\le a,\quad E_d\le 1.\end{aligned}\qquad(13)$$

Здесь величина $F(t)$ – поток сырья в жидкой фазе, подводимый в колонну и являющийся управлением; $x(L,t)$, $y(L,t)$ – концентрации целевого продукта в жидкой и паровой фазах; $L(\ell,t)$ – поток жидкости, $V(\ell, H)$ – поток пара; H_x, H_y – удерживающие способности в жидкости и паре; x_d – концентрация целевого продукта в дефлегматоре; x_k – концентрация целевого продукта в кубе. Возмущающее воздействие по концентрации целевого продукта в сырье F_2 (рис. 6, *а*); y^* – равновесная концентрация целевого продукта в паровой фазе; D, W – отбор целевого продукта вверху и внизу колонны; L_d – орошение.

Величины потоков при этом удовлетворяют условиям

$$\begin{aligned}&W(t)+D(t)=F(t),\quad D(t)+L_d(t)=V(1,t),\\&W(t)+V(0,t)=L(0,t),\quad V_d(t)=V(1,t).\end{aligned}\qquad(14)$$

Предполагается, что удерживающие способности H_x, H_y постоянны, V не зависит от ℓ.

Анализ условий (14) показывает, что только два из четырех потоков (W, D, L, V) являются независимыми. Выбор тех или иных двух независимых потоков в качестве управлений определяет соответствующие задачи. Эти задачи рассматриваются как задачи оптимального управления в классе кусочно-непрерывных управлений с критерием качества:

$$I=\int_0^T\int_0^L\left(y(\ell,t)-\theta^*(\ell,t)\right)^2\mathrm{d}\ell\,\mathrm{d}t,\qquad(15)$$

где θ^* – заданное значение концентрации целевого продукта.

Потоки L, D фиксированы, а V, V_d, L_d исключаются согласно (14). Управление F выбирается в классе кусочно-непрерывных функций и принимает значение в промежутке

$$F_{\min}\le F(t)\le F_{\max}.$$

Переходя к нормальной форме дифференциальных уравнений (10)–(12), получаем следующую задачу. Рассматривается процесс ректификации, описываемый уравнениями

$$\begin{aligned}&x_t'=\frac{1}{H_x}\left[\left(L+L^*\right)\zeta^{(1)}+\frac{\partial L^*}{\partial \ell}x+k\left(y-y^*\right)+\right.\\&\qquad\left.+Fx_F\Phi_x\right]\equiv X,\quad x'_l=\zeta^{(1)},\qquad(16)\\&y_t'=\frac{1}{H_y}\left[-(D+L)\zeta^{(2)}+k\left(y^*-y\right)\right]\equiv Y,\quad y'_l=\zeta^{(2)}\end{aligned}$$

при краевых условиях

$$\begin{aligned}&x'_{kt}=\frac{1}{H_{x_k}}\left[(L+F)x-Vy-Wx_k\right]\equiv X_k,\\&y=a\left[y_k^*-x_k\right]+x_k,\quad \ell=0,\quad 0<t<T;\\&x'_{dt}=\frac{1}{H_{x_d}}\left[(D+L)y_d-(L+D)x_d\right]\equiv X_d,\quad \ell=L,\quad 0<t<T,\\&(D+L)(y_d-y)-L(x_d-x)=0,\quad y_d-y-E_d\left(y_d^*-y\right)=0,\end{aligned}\qquad(17)$$

при начальных условиях (13) и ограничениях на управления

$$\left(F-F_{\min}\right)\left(F_{\max}-F\right)-u^2=0,\qquad(18)$$

где u – вспомогательное управление.

Задача состоит в том, чтобы в множестве кусочно-непрерывных функций F, удовлетворяющих условию (18), найти такую, что соответствующее ей решение задачи (16)–(18), (13) дает минимум интегралу (15). Применяя известную процедуру вариационного исчисления, получаем необходимое условие оптимальности:

$$\xi_t' - \frac{L+L^*}{H_x}\xi_\ell' = k\left(y^*\right)'\left(\frac{\xi}{H_x} - \frac{\eta}{H_y}\right),$$
$$\eta_t' + \frac{V}{H_y}\eta_\ell' = k\left(\frac{\xi}{H_x} - \frac{\eta}{H_y}\right); \qquad (19)$$

при $\ell = 0$, $0 < t < T$

$$\frac{d\lambda_k^{(1)}}{dt} = \frac{\lambda_k^{(1)}}{H_{x_k}}\left(F - D\right) + \lambda_k^{(2)}\left(a - 1 - a\left(y_k^*\right)\right),$$
$$\lambda_k^{(1)}\left(T\right) = 0,$$
$$\lambda_k^{(1)}\left(L+F\right) - \xi\left(L+L^*\right) = 0, \qquad (20)$$
$$V\left(\frac{\eta}{H_y} - \frac{\lambda_k^{(1)}}{H_{x_k}}\right) - \lambda_k^{(2)} = 0;$$

при $t = T$, $0 < \ell < L$, $\xi = 0$, $\eta = 0$;
при $\ell = L$, $0 < t < T$

$$\frac{d\lambda_d^{(1)}}{dt} = \frac{L+D}{H_{x_d}}\lambda_d^{(1)} - L\lambda_d^{(2)}, \qquad \lambda_d^{(1)}\left(T\right) = 0,$$
$$-\frac{V}{H_{x_d}}\lambda_d^{(1)} + \lambda_d^{(2)}V + \lambda_d^{(3)} = 0,$$
$$\left(\lambda_d^{(2)} - \frac{\xi}{H_{x_d}}\right)L - \frac{\xi}{H_{x_d}}L^* - \lambda_d^{(3)}E_d\left(y_d^*\right)' = 0, \qquad (21)$$
$$\left(\frac{\eta}{H_y} - \lambda_d^{(2)}\right)V - \lambda_d^{(3)}\left(1 - E_d\right) = 0;$$

при $0 < t < T$

$$H = \int_0^1 -\frac{\xi}{H_x}\left(\frac{\partial^2 L^*}{\partial\ell\partial F}x + \Phi_x x_F - \frac{\partial L^*}{\partial F}\zeta^{(1)}\right)d\ell -$$
$$-\frac{\lambda_k^{(1)}}{H_{x_k}}\left(x_k - x\right) + \gamma\left(F_{\min} + F_{\max} - 2F\right) = 0, \qquad (22)$$
$$\gamma u = 0,$$

где ξ, η, $\lambda^{(1)}{}_d$, $\lambda^{(2)}{}_d$, $\lambda^{(3)}{}_d$, $\lambda^{(1)}{}_k$, $\lambda^{(2)}{}_k$ – множители Лагранжа.

Алгоритм решения задачи оптимального управления содержит следующие этапы:

1) задается начальное приближение управляющей функции $F°(t)$;

2) решается система уравнений (10)–(13) и (19)–(21);

3) далее полагаем $F^{(n+1)} = F^{(n)} - \alpha H$;

4) предельные значения $F^{(n+1)}$ при $n \to \infty$ дают оптимальные управления.

На рис. 6 приведены результаты расчетов по оптимальному управлению для промышленной колонны К-34 [17–20] установки сернокислотного алкилирования изобутана бутиленами (разделяемая многокомпонентная смесь сведена к бинарной). Основные параметры: D = 27,06 кмоль/ч, W = 76,59 кмоль/ч, L_d = 45,21 кмоль/ч, Hx_d = 50 кмоль, Hx_k = 30 кмоль.

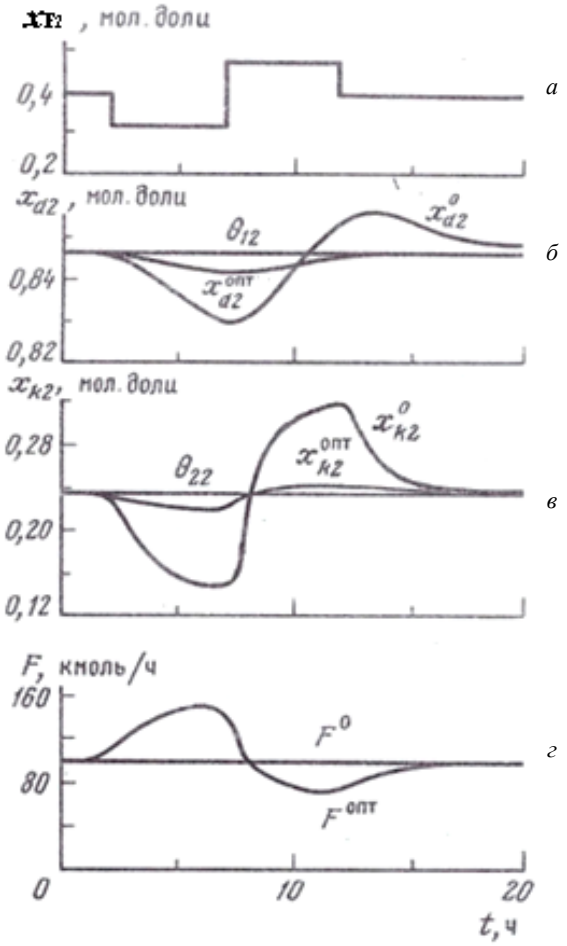


Рис. 6. Графики изменения концентрации бутана в сырье (*а*), дефлегматоре (*б*) и кубе (*в*) при управлении потоком сырья (*г*)

Заключение. Приведенная математическая модель процесса горения в технологических печах и процессов разделения в ректификационных колоннах является основной для проектирования оптимальных режимов промышленных установок. Расчет статических и динамических характеристик управляемого процесса позволяет определить основные параметры оптимальных процессов управления. Без знания динамических характеристик невозможно управление технологическими процессами в реальных условиях. Возможность получения параметров нестационарных режимов позволяет в режиме реального времени с высокой степенью эффективности избавиться от

вредного влияния возмущений. Эффективность данного подхода проиллюстрирована на процессах тепломассообмена в промышленных объектах.

Библиографические ссылки

1. Демиденко Н. Д. Моделирование статических и динамических режимов в трубчатых печах // Управление, вычислительная техника и информатика : Вестн. Томского гос. ун-та. 2012. № 3(20). С. 13–21.

2. Демиденко Н. Д., Кулагин В. А., Шокин Ю. И. Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем. Новосибирск : Наука. 2012. 424 с.

3. Демиденко Н. Д. Оптимальное управление режимами технологических печей // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 182–187.

4. Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Численный метод исследования стационарных режимов в технологических печах // Engineering & Technologies : J of Siberian Federal University. 2014. 1(7). 55-61.

5. Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В., Мельник И. Н. Анализ нестационарных режимов в системах контроля и управления распределенными параметрами // Информатика и системы управления : межвуз. сб. науч. тр. Вып. 9. Красноярск: ГУ НИИ информатики и процессов управления. 2004. С. 135–144.

6. Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Оптимальное управление режимами работы технологических печей в нефте-перерабатывающей промышленности // Фундаментальные исследования. 2005. № 2. С. 43–44.

7. Демиденко Н. Д. Моделирование и оптимизация тепломассообменных процессов в химической технологии. М. : Наука. 1991. 240 с.

8. Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Методы и средства оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах // Химическое и нефтегазовое Машиностроение. 2006. № 3. С. 8–9.

9. Демиденко Н. Д., Потапов В. И., Шокин Ю. И. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами. Новосибирск : Наука, 2006. 551 с.

10. Дьяконов С. Г., Елизаров В. И., Лаптев А. Г. Математические основы и моделирование процессов разделения веществ. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1993. 437 с.

11. Шахтахтинский Т. Н., Келбалиев Г. И. Аналогия и подобие нестационарных процессов конвективного тепломассопереноса // Докл. РАН. 1990. Т. 315, № 6. С. 1427–1429.

12. Кафаров В. В., Громов В. Ю., Матвейкин В. Г. Задачи управления объектами химической технологии при наличии нечеткости // Докл. РАН. 1994. Т. 337, № 5. С. 628–630.

13. Кафаров В. В., Громов В. Ю., Матвейкин В. Г. Математическое моделирование не полностью наблюдаемых химико-технологических объектов // Докл. РАН. 1994. Т. 337, № 1. С. 68–69.

14. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М. : Физматлит, 2001. 320 с.

15. Дворецкий С. И., Егоров А. Ф., Дворецкий Д. С. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 224 с.

16. Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Особенности сжигания топлива в технологических установках // Химическая техника. 2006. № 7. С. 35–37.

17. Кулагина Л. В. Проблема ингерентности и ликвидности перспективных энергогенерирующих систем // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения : Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Вып. IX. Красноярск : Краевое НТО, 2003. С. 45–56.

18. Демиденко Н. Д. Управляемые распределенные системы. Новосибирск : Наука. 1999. 392 с.

19. Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания топлива в технологических установках // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города : Материалы VI Всерос. НПК. Красноярск : ИПЦ КГТУ. 2005. С. 276–281.

20. Кулагина Л. В. Анализ теплофизических и гидродинамических процессов при сжигании различных видов топлив в энергетическом котле КВ-ТМ-180-150-25 // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения : Материалы Всерос. НПК. Вып. X. Красноярск : Краевое НТО. 2004. С. 29–45.

References

1. Demidenko N. D. [Modelirovanie staticheskih i dinamicheskih rejimov v trubchatih pechah]. *Upravlenie, vichislitel'naya technika i informatica*. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012, no. 3(20), p. 13–21. (In Russ.)

2. Demidenko N. D., Kulagin V. A., Shokin Y. I. *Modelirovanie i vichislitel'nie tehnologii raspredelenih sistem*. [Simulation and Computing Technologies for Distributed Systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2012, 424 p.

3. Demidenko N. D. [Optimal'noe upravlenie rejimami technologicheskih pechei]. *Vestnik SibGAU.* 2013, no. 3 (49), p. 182–187. (In Russ.)

4. Demidenko N. D., Kulagina L. V. [Chisleniy metod isledovaniya stacionarnih rejimov v technologicheskih pechah]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* 2014, Vol. 7, Issue 1, p. 55–61. (In Russ.)

5. Demidenko N. D., Kulagina L. V., Mel'nik I. N. [Non-stationary modes analysis in control and management systems with distributed parameters]. *Informatika I sistemi upravleniya*. 2004, no. 5, p. 135–144. (In Russ.)

6. Demidenko N. D., Kulagina L. V. [Optimal control of the operation modes in technological furnaces for refining industry]. *Fundamental'nie issledovaniya*. 2005, no. 2, p. 43–44. (In Russ.)

7. Demidenko N. D. *Modelirovanie i optimizaciya teplo-masoobmehhih procesov v chimicheskoy technologiy.* [Simulation and Optimization for Heat-

Mass-exchange Processes in the Chemical Engineering] Moscow, Nauka Publ., 1991, 240 p.

8. Demidenko N. D., Kulagina L. V. [Means and facilities for optimal control of the technological processes in tube furnaces]. *Himicheskoe i neftegezovoe machinostroenie.* 2006, no. 3, p. 8–9. (In Russ.)

9. Demidenko N. D., Potapov V. I., Shokin U. I. *Modelirovanie i optimizaciya sistem s raspredelennimi parametrami* [Simulation and optimization for systems with distributed parameters]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006, 551 p.

10. D'yakonov S. G., Elizarov V. I., Laptev A. G. *Matematicheskie osnovi i modelirovanie procesov razdeleniya veshestv* [Mathematical foundations and simulation of processes of separation of substances]. 1993, Kazan, Kazan University Publ., 437 p.

11. Shahtahtinskiy T. N., Kelbaliev G. I. [Analogie and similarity of non-stationary processes of convective heat- and mass-transfer]. *Doklady RAN.* 1990, Vol. 315, no. 6, p. 1427–1429. (In Russ.)

12. Kafarov V. V., Gromov V. U., Matveikin V. G. [Tasks of objects' management in chemical engineering while fuzziness] *Doklady RAN.* 1994, Vol. 337, no. 5, p. 628–630. (In Russ.)

13. Kafarov V. V., Gromov V. U., Matveikin V. G. [Mathematical simulation for not fully observed chemical and technological properties]. *Doklady RAN.* 1994, Vol. 337, no. 1, p. 68–69. (In Russ.)

14. Samarskiy A. A., Mihailov A. P. *Matematicheskoe modelirovanie: idei, metodi, primeri* [Mathematical simulation: ideas, methods, examples]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 320 p. (In Russ.)

15. Dvoreckiy S. I., Egorov A. F., Dvoreckiy D. S. *Komp'uternoe modelirovanie i optimizaciya tehnologicheskih procesov I oborudovaniya* [Computer simulation and optimization of industrial processes and hardware]. Tambov, Tambov. State. tehn. University Publ., 2003, 224 p.

16. Demidenko N. D., Kulagina L. V. [Features of fuel burning in the technological furnaces]. *Chimicheskaya technika*. 2006, no. 7, p. 35–37. (In Russ.)

17. Kulagina L. V. [Ingerente and liquidity tasks in perspective power generation systems]. *Materialy Vseros. nauchyu-praktyu konf. "Sotsial'nyye problemy inzhenernoy ekologii, prirodopol'zovaniya i resursosberezheniya". Vyp. IX.* [Proceedings of All-Russia. Teach-practical conference "Social problems of engineering ecologie, environmental management and resource saving"]. Issue. IX, Krasnoyarsk, Krayevoye NTO Publ., 2003, p. 45–56. (In Russ.)

18. Demidenko N. D. *Upravlyaemie raspredelennie sistemi* [Controlled distributed systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999, 392 p. (In Russ.)

19. Demidenko N. D., Kulagina L. V. [Improving the efficiency and environmental security of fuel combustion in industrial plants]. *Materialy VI Vseros. nauch.-prakt konf. "Energoefectivnost' sistem jizneobespecheniya goroda"* [Proceedings of the VI All-Russia. scientific-practical conference "Energy efficiency of city life-support systems"]. Krasnoyarsk, IPTS KGTU Publ., 2005, p. 276–281. (In Russ.)

20. Kulagina L. V. [Analysis of thermal and hydrodynamic processes during combustion of different fuels in the power boiler KV-TM-180-150-25] *Materiali Vseros. nauch.-prakt konf. "Social'nie problemi injenernoy ekologii, prorodopol'zovaniya iresursosberejeniya"* [Materials Vseros. scientific-practical conference "Social problems of environmental engineering, environmental management and resource saving"]. Issue. X. Krasnoyarsk, 2004, p. 29–45. (In Russ.)

© Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В., 2014

УКД 621.313.1

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 63–67

ПРОВЕДЕНИЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА АКТИВНОЙ ЧАСТИ ТОРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА В СРЕДЕ ANSYS

Е. В. Карпенко, Н. А. Колбасина, Д. И. Морозов

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26
E-mail: cat.kras@gmail.com

Объектом исследования является низкоскоростной торцевой синхронный генератор. Обосновывается необходимость и методика проведения проверочных расчетов работоспособности таких генераторов. Конечно-элементный анализ приводится как один из инструментов реализации подобных расчетов, и его результаты для заданных параметров приводятся в конце статьи. Рассматриваются основные этапы проведения расчета и возможности среды ANSYS. Для упрощения работы в среде ANSYS разработан программный продукт, позволяющий строить расчетную модель в автоматизированном режиме. Использование программного продукта может быть полезно для конструкторско-технологических задач производства, повышения конкурентоспособности и спроса на изделие.

Ключевые слова: низкоскоростной торцевой синхронный генератор, метод конечных элементов, автоматизация проектирования.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 63–67

STRUCTURAL ANALYSIS IN ANSYS OF THE AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR

E. V. Karpenko, N. A. Kolbasina, D. I. Morozov

Siberian Federal University
26, Kirenskiy St., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: cat.kras@gmail.com

The object of this research is the axial flux permanent magnet generator. In the article the necessity and technique of checking calculations of the generators is described. A finite element analysis is provided as a tool for these calculations. Its results for the specified parameters are at the end of the article. The main stages of the calculation and the possibilities of the environment ANSYS were examined. To simplify the work in the ANSYS environment software that allows you to build a simulation model in an automated mode was developed. Using our software can be useful for design and technological production tasks, improving competitiveness and increasing demand for the product. The resulting computational model in ANSYS environment allows you to get a complete picture of the stress-strain state of the computational model. Developed software as a part of an automated design environment of the generator, greatly simplifies the process of solution, because it requires only the input of the parameters without entering commands in the language APDL. Such automated model significantly reduces the time spent on the construction of computational models, and excludes cases of incorrect commands for environment ANSYS. In the future, this software will significantly simplify the design and testing of new designs generators.

Keywords: axial flux permanent magnet generator, finite element method, computer-aided engineering.

Низкоскоростные торцевые синхронные генераторы находят применение для нужд малой энергетики. Ввиду своих малых осевых размеров и возможности работы на низких оборотах их используют для преобразования энергии движения ветро- или гидротурбины в электрическую энергию. Торцевые генераторы отличаются от традиционных цилиндрических синхронных генераторов направлением магнитного потока и имеют высокотехнологичную конструкцию и низкую материалоемкость [1]. В торцевых генераторах магнитный поток направлен параллельно оси вращения (аксиально), в то время как в цилиндрических – перпендикулярно оси вращения (радиально).

Существует несколько различных вариантов конструкций торцевых генераторов, неизменным остается то, что во всех топологиях аксиально намагниченные

магниты вмонтированы в круглый диск ротора. Для варианта конструкции с одним ротором и двумя статорами магниты располагаются с двух сторон диска ротора, который размещен между статорами. В такой компоновке на ротор действуют две силы, одинаковые по величине и противоположные по направлению, эти силы компенсируются в случае, если ротор помещен строго посередине между статорами. Оба диска статора также испытывают на себе действие сил.

В компоновке с двумя роторами и одним статором два зеркально расположенных ротора с постоянными магнитами, вмонтированными с одной стороны дисков ротора, установлены на вал. Статор располагается между двумя дисками ротора и испытывает на себе силы, с которыми роторы притягиваются к статору. Если статор расположен не строго посередине между роторами, то действует результирующая сила.

В многоступенчатых топологиях количество роторов на один больше количества статоров. При этом в конструкции используются два типа роторов: внешний (постоянные магниты вмонтированы только с одной стороны диска ротора) и промежуточный (постоянные магниты вмонтированы с двух сторон диска ротора).

В процессе сборки генератора будет действовать максимальная притягивающая сила между статором и ротором. Действие этой силы необходимо учитывать при проведении структурного анализа электрической машины. Для выбора оптимальной конструкции необходимо провести ряд проверочных расчетов для нескольких компоновок машин. Существуют аналитические зависимости, связывающие максимально допустимые деформации с конструктивными размерами. Однако эти выражения не дают возможности быстро и с большой точностью получить результаты. Поэтому чаще используются численные методы решения, например, метод конечных элементов [2]. Программный продукт ANSYS позволяет с достаточным уровнем достоверности оценить влияние притягивающей силы на конструкцию электрической машины, в частности, активную ее часть – статор и ротор. Дальнейший расчет будет проводиться в среде ANSYS.

Среда конечно-элементного анализа ANSYS позволяет получить на выходе из решения файл с расширением «log», хранящий в себе все данные расчетной модели с возможностью их корректировки, написанный на языке APDL. Это позволяет разработать программный продукт для управления параметрами решения. Такой подход позволяет сделать построение расчетной модели автоматизированным, что существенно сокращает затрачиваемое время и не требует высокой квалификации пользователя при работе в среде ANSYS. В некоторых случаях работа в среде ANSYS требует не только достаточных навыков, но и большой внимательности, что затрудняет получение решения в короткие сроки, тогда когда время подчас является критическим фактором. Следует отметить, что программный продукт является частью автоматизированной среды проектирования торцевого генератора [3; 4]. Интерфейс разработанного программного продукта с введенными данными показан на рис. 1.

В программу задаются требуемые геометрические размеры ротора, статора, вала, типы элементов в среде ANSYS, параметры материала, величина силы магнитного притяжения, характеристики подшипников. Также возможна корректировка размерности сетки. Все эти переменные являются параметрами, которые можно изменять и в автоматизированном режиме перестраивать расчетную модель. А регулировка плотности сетки позволяет получить результаты с требуемой точностью. Программный продукт может быть использован в том числе как инструментарий для проведения исследований влияния размерности сетки на точность получаемых результатов при проведении расчетов в различных дисциплинах, таких как статика, динамика и анализ электромагнитных процессов. В программе используется буквенный код обозначения номера объема, который позволяет в выходном файле наглядно отслеживать нумерацию создаваемых объемов, а также при дальнейших изменениях конструкции позволяет вставлять новые построения, избегая при этом полной корректировки программного кода. Формируемый программой log-файл содержит в себе процедуру решения задачи в среде ANSYS, которая по шагам описывается ниже.

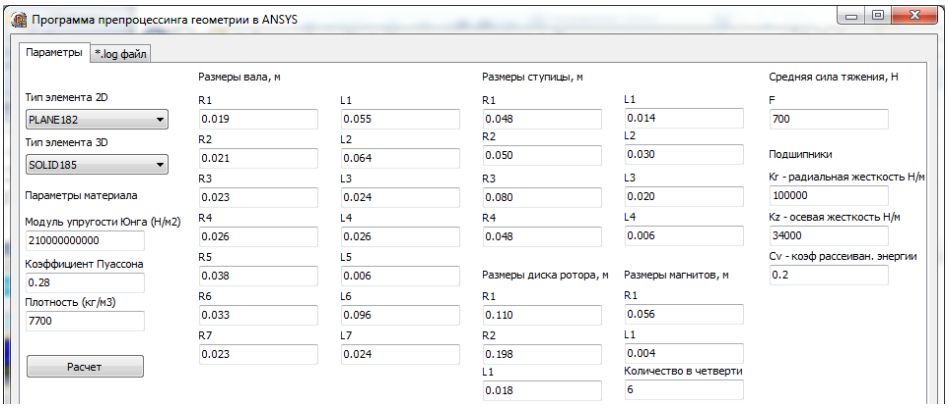


Рис. 1. Интерфейс программного продукта

Выполнение конечно-элементного анализа в среде ANSYS подразумевает выполнение следующих этапов [5]:

1) определение типов элементов;
2) задание свойств материалов;
3) создание расчетной параметризованной модели;
4) разбиение на конечно-элементную сетку;
5) приложение нагрузок и ограничений;
6) выполнение расчета;
7) просмотр результатов.

Для решения задачи использованы следующие элементы: плоский PLANE182 и объемный SOLID185. Элемент PLANE182 предназначен для двухмерного моделирования плоско-деформируемых или осесимметричных задач. Элемент состоит из четырех узлов, имеющих 2 степени свободы – перемещение вдоль оси *X* и *Y*. В данной задаче плоский элемент используется для разбиения на сетку поверхностей модели с целью последующего экструдирования, что позволяет полностью контролировать процесс создания регулярной объемной сетки с заданными характеристиками. Элемент SOLID185 предназначен для трехмерного моделирования. Элемент состоит из восьми узлов, имеющих 3 степени свободы – перемещение вдоль осей *X*, *Y* и *Z* [6].

В задаче используется модель изотропного материала со следующими характеристиками: Модуль Юнга (Young's Modulus) = 2,1e11 (Па); коэффициент Пуассона (Poisson's ratio (minor)) = 0,28; плотность (Mass density) = 7700 (кг/м^3) [7].

Для построения расчетной модели конструкция генератора была несколько упрощена. Поскольку искомой является величина деформации диска ротора, статоры заменены действием сил магнитного притяжения по обеим сторонам диска ротора. Неизменными в расчетной модели (рис. 2) остаются вал, ступица, диск ротора и магниты.

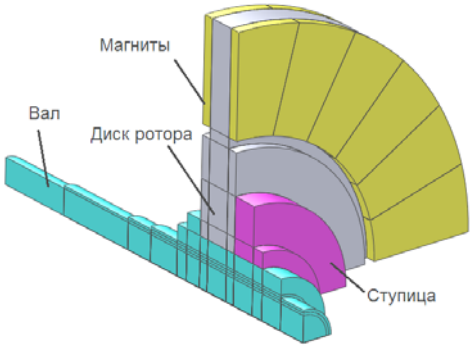


Рис. 2. Расчетная модель торцевого генератора с одним ротором и двумя статорами

Расчетная модель имеет две плоскости симметрии и ось вращения. Для расчета методом конечных элементов необходимо создание сеточной модели, т. е. замена твердотельной модели набором конечных элементов. В основу разбиения сетки положено разбиение торца вала. С учетом полученных элементов генерируется трехмерная сетка для всей четверти модели (рис. 3).

Параметризация геометрии позволяет организовать процесс поиска нужного узла или другого объекта, в том числе в зависимости от координат, и реализовать оптимизацию по заданным критериальным ограничениям и параметрам. Такой принцип построения позволяет задавать нагрузку в каждом узле и выполнять требования к качеству сетки. Сетка проверяется на отсутствие вырожденных углов, на точность стыковки узлов сетки в сегментах модели и др.

Так как диаметр вала в несколько раз меньше диаметра диска ротора, появилась необходимость в применении шаблона соединения частей сетки, без которого размеры элементов увеличивались бы с увеличением диаметра, что привело бы к огрублению результатов.

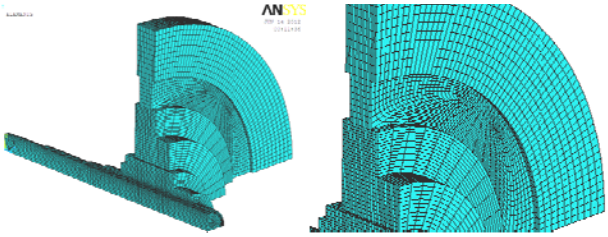
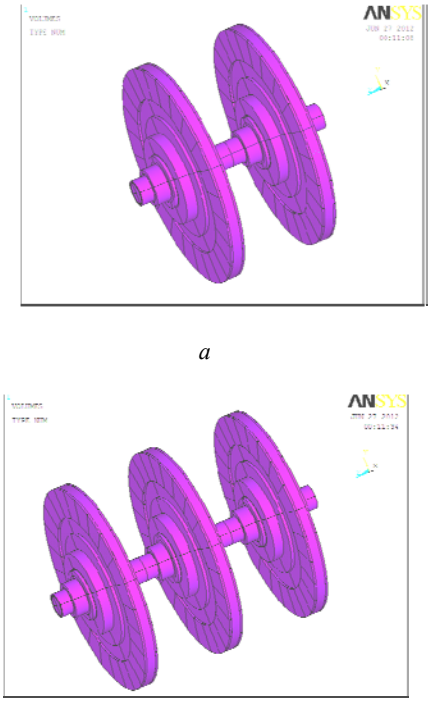


Рис. 3. Конечно-элементная сетка

Путем варьирования количества ступеней генератора создается расчетная модель генератора большей мощности (рис. 4).



а

б

Рис. 4. Расчетная модель двух- (*а*) и трехступенчатых (*б*) генераторов

Помимо количества ступеней существует возможность создать расчетную модель активной части торцевого генератора, варьируя следующими параметрами:

1) количество магнитов;

2) одностороннее или двустороннее приложение сил в зависимости от наличия в конструкции статора с одной стороны или с двух сторон от диска ротора;

3) геометрические параметры и др.

Сила магнитного притяжения на постоянных магнитах для анализа напряженно-деформированного состояния активной части генератора может быть получена из трех источников: из натурного эксперимента, по расчетной теоретической модели, из численного анализа электромагнитных процессов в генераторе. Для примера приведен случай использования экспериментальных данных силы магнитного притяжения, а именно, максимального и минимального значения силы для торцевого генератора мощностью 1 кВт с одним ротором и одним статором (рис. 5).

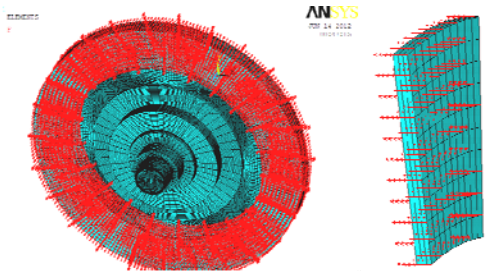


Рис. 5. Приложение силы притяжения на магниты ротора

Непосредственное значение сил рассчитывалось по следующей методике. Для случая, когда известны значения максимальной и минимальной сил притяжения, значение силы в узлах определяется по формуле

$$F_i = \frac{1}{2}\cdot(F_{\max} + F_{\min}) + \frac{1}{2}\cdot(F_{\max} - F_{\min})\cdot\cos\left(\frac{2\pi\cdot i}{P}\right),$$

где F_i – сила притяжения i-го магнита, Н; $F_{\max}$ – максимальная сила притяжения, Н; $F_{\min}$ – минимальная сила притяжения, Н; P – число пар полюсов.

Для случая, когда известна средняя сила притяжения, значение силы в узлах магнитов определяется по формулам

$$F_i = F_0 + \Delta F\cdot\cos\left(\frac{2\pi\cdot i}{P}\right),$$

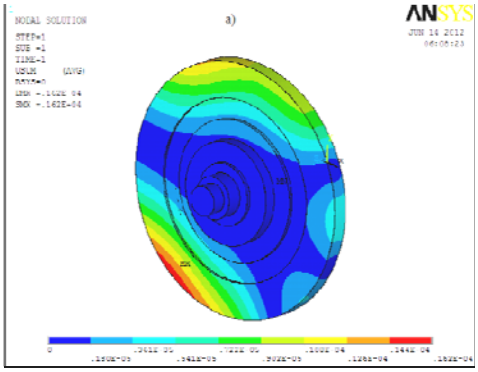
$$\Delta F = F_0\cdot R\cdot\sin\alpha,$$

где α – начальный угол перекоса диска под влиянием технологических погрешностей; F_0 – средняя сила, Н.

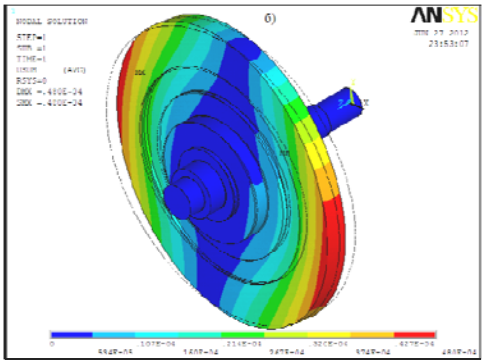
Ограничениями для вала являются подшипниковые опоры. Существует возможность как задать их жестко, так и задать радиальную и осевую жесткость. Как показали результаты исследования, выбор способа задания подшипниковых опор существенно не влияет на суммарные деформации.

Структурный анализ позволяет получить на выходе значения напряжений, деформаций и перемещений в расчетной модели. Поскольку ставится задача проверки соблюдения зазора между статором и ротором, анализируются значения суммарных перемещений под действием силы магнитного притяжения.

По результатам решения суммарные перемещения для одного диска ротора (рис. 6) без учета начального перекоса диска составляют не более 0,016 мм (рис. 6, *а*). С учетом начального перекоса величина суммарных перемещений возрастает и составляет не более 0,048 мм (рис. 6, *б*).



а



б

Рис. 6. Суммарные перемещения для одного диска ротора

При анализе конструкции, состоящей из двух роторов, на валу суммарные перемещения составили не более 0,001 мм без учета начального перекоса и не более 0,048 мм с учетом начального перекоса дисков роторов.

Полученная расчетная модель в среде ANSYS позволяет получить полную картину напряженно-деформированного состояния расчетной модели. Разработанный программный продукт как часть автоматизированной среды проектирования торцевого генератора существенно упрощает процесс проведения решения, поскольку требует ввода лишь входных параметров без ввода команд на языке APDL. Такое автоматизированное построение модели существенно сокращает время, затрачиваемое на построение расчетной модели, и исключает случаи некорректного написания команд для среды ANSYS. В дальнейшем этот программный продукт существенно упростит проектирование и проверку новых конструкций торцевых генераторов.

Библиографические ссылки

1. Электромагнитная модель и оптимизация параметров торцевого генератора / А. Л. Встовский [и др.]. // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14, № 1–2. С. 653–657.

2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 543 с.

3. Карпенко Е. В., Карпенко В. В., Головин М. П. Автоматизация проектирования торцевых генераторов мощностью до 20 кВт // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 28–34.

4. Морозов Д. И., Карпенко Е. В., Колбасина Н. А. Оптимизационный синтез параметров низкоскоростного торцевого синхронного генератора // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 1 (41). С. 38–42.

5. Басов К. А. ANSYS в руках инженера. М. : КомпьютерПресс, 2002. 224 с.

6. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров : справ. пособие. М. : Машиностроение-1, 2004. 512 с.

7. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М. : Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

References

1. Vstovskiy A. L., Golovin M. P., Fediy K. S., Kolbasina N. A., Morozov D. I. [Electromagnetic model and optimization parameters of the face generator]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. Samara, 2012, Vol. 14, no. 1–2, p. 653–657. (In Russ.)

2. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in the engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975, 543 p.

3. Karpenko E. V., Karpenko V. V., Golovin M. P. [Automation of design of butt generators with the capacity up to 20 kW]. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2(48), p. 28–34. (In Russ.)

4. Morozov D. I., Karpenko E. V., Kolbasina N. A. [Optimizing synthesis of a low-speed butt alternator characteristics]. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 1(41), p. 38–42. (In Russ.)

5. Basov K. A. *ANSYS v rukakh inzhenera* [ANSYS in the hands of the engineer]. Moscow, Komp'yuterPress Publ., 2002, 224 p.

6. Chigarev A. V., Kravchuk A. S., Smalyuk A. F. *ANSYS dlja inzhenerov. Spravochnoe posobie* [ANSYS to engineers. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004, 512 p.

7. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. *ANSYS v rukah inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of the engineer. A practical guide]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003, 272 p.

© Карпенко Е. В., Колбасина Н. А., Морозов Д. И., 2014

УДК: 519.7; 519.66; 57.087.1, 612.087.1

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 68–72

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ БОЛЬШИХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

С. В. Качалин

Пензенский государственный университет
Российская Федерация, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40
E-mail: cnit@pnzgu.ru

Рассматривается проблема повышения быстроты, устойчивости и экономичности известных и перспективных алгоритмов обучения больших искусственных нейронных сетей. Для решения этой задачи предлагается создать максимально сбалансированные многокритериальные показатели сравнения разных алгоритмов обучения, ввести численную оценку параметров обучения и планомерно осуществлять работы по их повышению. Утверждается, что устойчивость обучения нейронных сетей является аналогом процедуры оценки числа обусловленности матриц линейной алгебры. Предложен показатель устойчивости обучения, дана связь этого показателя с вычислительной сложностью алгоритмов обучения, а также с числом примеров, на которых алгоритм работоспособен. Обсуждается эффект повышения устойчивости за счет дополнения обучающей выборки синтетическими примерами образа «Свой». Приводится оптимальное количество дополнительных синтетических примеров, добавление которых позволяет уменьшить количество примеров в обучающей выборке. Представлена блок-схема перспективного средства обучения нейросетевых преобразователей, в которой вводится третий автомат размножения примеров образа «Свой». Чтобы контролировать количество синтетических примеров, предлагается создать таблицу ограничений для первых автоматов с учетом мнения экспертов.

Ключевые слова: биометрия, нейронная сеть, обучение, распознавание образов, статистика, вероятность, гистограмма.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 68–72

ASSESSMENT OF STABILITY LEARNING ALGORITHMS LARGE ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS OF BIOMETRIC APPLICATION

S. V. Kachalin

Penza State University
40, Krasnaya str., Penza, 440026, Russian Federation
E-mail: cnit@pnzgu.ru

The problem of increasing the speed, stability and efficiency of known and emerging algorithms for training large artificial neural networks is considered. To solve this problem it is proposed to create the most balanced multi-criteria performance comparison of different learning algorithms, enter a numerical estimate of the learning parameters and systematically carry out work to improve them. It is argued that resistance training of neural networks is an analogue of the assessment procedure of the condition number of matrices of linear algebra. We propose a measure of stability training, given the connection between this indicator with the computational complexity of learning algorithms, as well as with a number of examples on which the algorithm is efficient. We discuss the effect of increasing the stability by supplementing the training sample synthetic image examples of "your". The optimum amount of additional synthetic examples, the addition of which can reduce the number of examples in the training set is provided. A block diagram of a promising means of training neural network converters, which introduced the third machine reproduction examples image of "Its" is given. To control the number of synthetic examples, it is proposed to create a table of restrictions for the first machines based on expert opinion.

Keywords: biometrics, neural network, learning, pattern recognition, statistics, probability, histogram.

Введение. На сегодняшний день известно порядка 100 алгоритмов обучения искусственных нейронных сетей [1; 2]. В конце XX в. было хорошим тоном предлагать эвристические алгоритмы обучения и их комбинации. При этом сравнить алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей оказывается достаточно сложно. У тех, кто занимается обработкой изображений, существуют стандартные изображения, кочующие примерно 20 лет из одной работы в другую. Это вполне понятный органолептический подход к сравнению алгоритмов обработки изображений. Читатель сам решает, какая обработка лучше, если на одной странице приведено стандартное изображение после двух разных процедур обработки.

К сожалению, в литературе по обучению искусственных нейронных сетей нет даже такого подхода. Отсутствуют стандартные (типовые) примеры распознаваемых образов, при обучении на которых можно было бы сравнить конкурирующие между собой алгоритмы обучения. Сложность проблемы сравнения алгоритмов обучения искусственных нейронных сетей обусловлена тем, что на них влияют как минимум пять составляющих:

– информативность распознаваемого образа;

– число учитываемых при распознавании параметров;

– число примеров образа, используемых при обучении;

– вычислительная сложность процедур обучения;

– устойчивость процедуры обучения.

Рассматривать влияние сразу всех факторов крайне трудно. Необходимо попытаться снизить число факторов, переопределив их один через другой. Желательно создать максимально сбалансированные многокритериальные показатели сравнения разных алгоритмов обучения.

Актуальность этой задачи высока уже сегодня, в будущем актуальность будет увеличиваться. Каждому придется лично столкнуться с программными роботами, задачей которых будет надежное распознавание биометрического образа «Свой» и еще более надежное распознавание образов «Чужой» при охране персональной информации гражданина, находящейся в личных кабинетах и облачных хранилищах. Быстрое, устойчивое, экономичное обучение возможно, если иметь возможность численной оценки этих параметров обучения и планомерно осуществлять работы по их повышению. Сегодня очевидно, что предстоит значительная работа по совершенствованию алгоритма автоматического обучения по ГОСТ Р 52633.5–2011 [3]. Вводить какие-либо модификации в стандартный алгоритм обучения можно только в том случае, если они улучшат часть показателей, сохранив при этом высокий уровень других показателей.

Обратимся к хорошо изученным преобразованиям линейной алгебры и математической статистики. Известно, что применительно к задаче биометрии можно использовать квадратичные формы [4]:

$$e^2 = (E(\overline{x}) - \overline{x})^T \cdot [\rho]^{-1} \cdot (E(\overline{x}) - \overline{x}), \qquad (1)$$

где $\overline{x}$ – вектор из n биометрических параметров образа «Свой»; $E(\overline{x})$ – вектор математических ожиданий биометрических параметров; $[\rho]$ – квадратная матрица ковариационных функций контролируемых биометрических параметров.

Решающее правило строится путем сравнения квадрата эллиптического расстояния (1) с некоторым порогом Θ:

$$\begin{cases} z \leftarrow \text{«1»}, \text{ если } e^2 \le \Theta, \\ z \leftarrow \text{«0»}, \text{ если } e^2 > \Theta. \end{cases} \qquad (2)$$

Квадратичная форма (1) при использовании решающего правила (2) создает некоторую поверхность в форме гиперэллипса с центром в точке математических ожиданий $E(\overline{x})$ контролируемых биометрических параметров. Внутри объема гиперэллипса решающее правило дает состояние «1», соответствующее распределению данных образа «Свой». Вне поверхности решающее правило дает состояние «0», соответствующее множеству данных образов «Чужой».

В терминах биометрии обучению соответствуют процедуры вычисления элементов матрицы коэффициентов ковариации и процедура ее обращения. Очевидно, что для вычисления коэффициентов ковариации потребуется использовать k примеров образа «Свой». Чем больше требуется примеров в обучающей выборке, тем менее экономичной будет процедура обучения.

С другой стороны, число примеров в обучающей выборке можно оценить, зная число обусловленности матрицы коэффициентов ковариации – cond[ρ]. Чем выше число обусловленности, тем больше примеров нужно использовать для вычисления коэффициентов ковариации. В первом приближении будем считать, что связь линейна, число примеров и число обусловленности – это показатель неустойчивости:

$$k \approx \text{cond}[\rho]. \qquad (3)$$

Тогда обратная величина будет иметь смысл показателя устойчивости (экономичности) процедур обучения:

$$D_{\text{УСТ}} \approx \frac{1}{k} \approx \frac{1}{\text{cond}[\rho]}. \qquad (4)$$

Минимальное значение cond[ρ] может быть единичным, т. е. предельно устойчивый алгоритм обучения должен обучаться на одном примере образа «Свой». Если для обучения необходимо 100 примеров, то показатель устойчивости алгоритма обучения будет 0,01. Если алгоритм обучения не работает, его устойчивость нулевая. Это эквивалентно необходимости использовать при обучении бесконечное число примеров $k = \infty$.

При реализации любого решающего правила возникают ошибки первого рода (отказ в доступе «Своему») и ошибки второго рода (ошибочный пропуск

«Чужого»). Биометрические системы легко сравниваются, если вероятности ошибок первого и второго рода одинаковы [5; 6]:

$$P_1 = P_2 = P_{EE}. \quad (5)$$

Однако выполнить условие равной вероятности ошибок (5) для ряда биометрических систем технически невозможно. В связи с этим возможно оценивать равновероятную ошибку как среднее геометрическое двух ошибок [4]:

$$P_{EE} \approx \sqrt{P_1 \cdot P_2}. \quad (6)$$

Чем меньше равновероятная ошибка, тем лучше биометрическая система и, соответственно, алгоритм ее обучения. С другой стороны, система и алгоритм тем хуже, чем больше он требует примеров для своего обучения. Учесть все это можно через использование следующего показателя качества:

$$Q = \frac{-\log_2(P_1) - \log_2(P_2)}{2 \cdot k}. \quad (7)$$

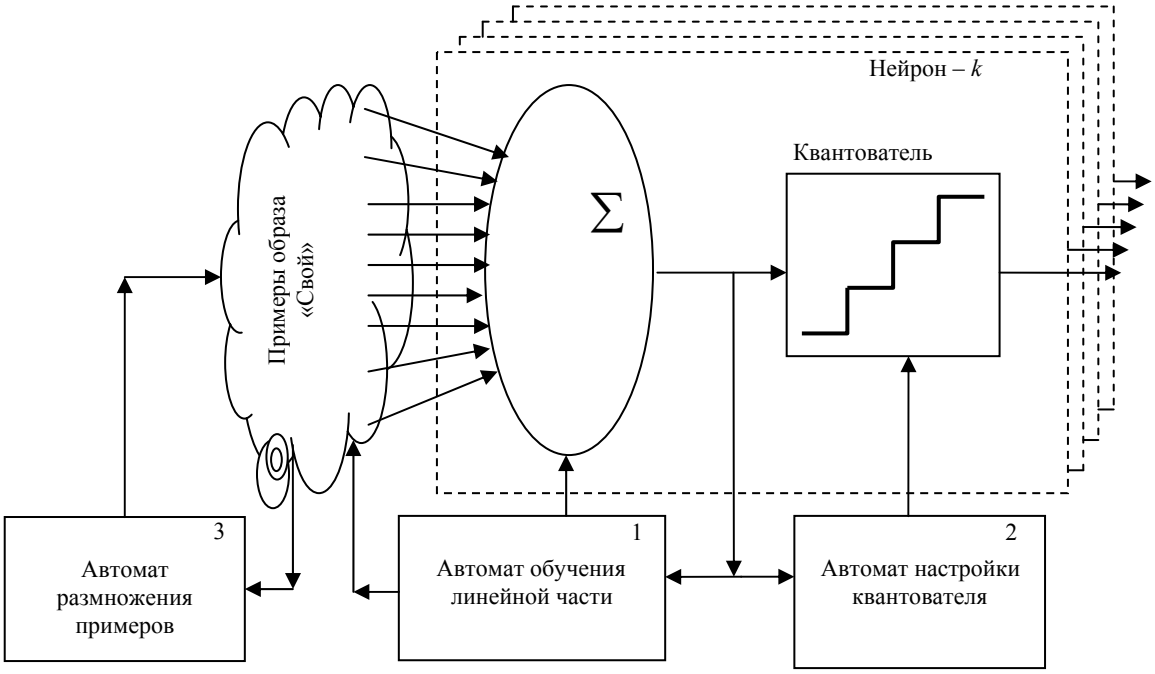
Очевидно, что комплексный показатель качества (7) оказывается способен учитывать множество параметров алгоритма обучения. Пользуясь им, можно сравнивать между собой любые алгоритмы обучения.

Одним из технических приемов, позволяющих улучшить показатель качества алгоритма, является искусственное увеличение данных в обучающей выборке. Синтезированные дополнительные данные за рубежом [7] имеют устоявшееся название бутстрап-подмножеств. В России ГОСТ Р 52633.2–2010 [8] описывает процедуру синтеза данных примеров – потомков образа «Свой» из двух примеров-родителей. То есть сформировались два направления, использующие искусственное размножение данных в обучающей выборке.

Практика показывает, что незначительное увеличение данных в обучающей выборке практически всегда приводит к положительному результату [9–11]. Однако существует некоторый оптимум числа дополнительно синтезированных данных. Избыточное раздувание размеров обучающей выборки синтезированными примерами образа «Свой» вредно. В связи с этим возникает вопрос, на какое число синтетических примеров может быть увеличена обучающая выборка.

Предположим, что статистически доказано, что при 21 примере в обучающей выборке можно безопасно добавлять 4 дополнительных синтетических примера. То есть вместо 25 примеров мы можем достичь тех же самых показателей ошибок первого и второго рода на 21 примере. Последнее эквивалентно повышению показателя устойчивости алгоритма обучения (4) на 19 %.

Получается, что в будущем возможно появление дополнения для уже созданных автоматов обучения еще одним дополнительным автоматом, который будет увеличивать обучающие выборки примеров «Свой» некоторым числом дополнительных синтетических примеров. Намечается тенденция явного усложнения (усиления интеллектуальности) средств обучения нейросетевых преобразователей биометрия–код. Блок-схема перспективного средства обучения нейросетевых преобразователей представлена на рисунке.



Блок-схема средства с повышенной устойчивостью обучения за счет дополнения примеров в обучающей выборке

Из рисунка видно, что в дополнение к двум автоматам обучения одиночных искусственных нейронов нейросети необходимо иметь третий автомат размножения примеров образа «Свой».

На сегодняшний день не существует средств обучения искусственной нейронной сети, способных оптимально увеличивать размеры обучающей выборки. Предположительно, что первые автоматы дополнения обучающих выборок будут строиться путем заполнения пустот в гистограммах исходных биометрических данных и иметь жесткие ограничения на число дополнительно созданных примеров. Таблицу ограничений для первых автоматов предполагается создавать с учетом мнения экспертов. Фактически предполагается свернуть некоторую экспертную систему принятия решений до двухмерной таблицы ограничений, учитывающей число примеров-родителей и показатели качества всего образа «Свой», вычисленные по ГОСТ Р 52633.1–2009 [12].

Следует подчеркнуть, что все вышесказанное относится к обычным бинарным искусственным нейронным сетям. Эти сети состоят из бинарных нейронов (сумматора и бинарного квантователя на его выходе). Однако в работах [13–15] показано, что перспективой является переход к нейронам с более сложными квантователями. В частности, на рисунке показан нейрон с трехпороговым выходным квантователем, имеющим 4 выходных состояния «00», «01», «10», «11».

Переход к использованию квантователей с более чем двумя устойчивыми выходными состояниями приводит к значительному росту хеширующих свойств нейронов для образов «Чужой», однако за это приходится платить повышением требований к размерам обучающей выборки биометрических образов «Свой». Затронутая в данной статье проблема устойчивости алгоритмов обучения в ближайшем будущем будет обостряться. Таким образом, введение в биометрические приложения автомата размножения примеров образа «Свой» является одним из возможных решений задачи.

Библиографические ссылки

1. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории. М. : Горячая линия-Телеком, 2010. 496 с.

2. Саймон Хайкин. Нейронные сети. Полный курс. Вильямс, 2006. 1104 с.

3. ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия – код доступа. М. : Стандартинформ, 2012. 20 с.

4. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М. : Мир. 1976. 507 с.

5. Руководство по биометрии / Болл Руд [и др.]. М. : Техносфера, 2007. 368 с.

6. Иванов А. И. Сопоставительный анализ конкурирующих технологий биометрико-криптографической аутентификации личности // Защита информации. INSAID. 2014. № 3. С. 3–9.

7. Efron B. Bootstrap methods: Another look at the Jackknife. Ann. Statistics, 7:1-26, 1979.

8. ГОСТ Р 52633.2–2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. М. : Стандартинформ, 2011. 24 с.

9. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов [и др.]. М. : Радиотехника, 2012. 160 с.

10. Ахметов Б. С., Волчихин В. И., Иванов А. И., Малыгин А. Ю. Алгоритмы тестирования биометрико-нейросетевых механизмов защиты информации. [Электронный ресурс]. Алматы : КазНТУ им. Сатпаева, 2013. 152 с. ISBN 978-101-228-586-4, URL: http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-01-04-11940.pdf.

11. Ахметов Б. С. [и др.]. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа : монография. [Электронный ресурс]. Алматы : ТОО «Издательство LEM», 2014. 144 с. URL: http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-06-27-11940.pdf.

12. ГОСТ Р 52633.1–2009. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. М. : Стандартинформ, 2010. 24 с.

13. Иванов А. И. Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений : монография. Пенза : ПГУ, 2000. 178 с.

14. Куликов С. В. [и др.]. Учет «тяжелых» хвостов ненормального закона распределения биометрических параметров все «Чужие» при настройке нелинейного элемента нейрона с несколькими дискретными состояниями // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2012. № 3. С. 56–59.

15. Волчихин В. И. Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации / В. И. Волчихин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4(28). С. 88–99.

References

1. Galushkin A. I. *Neyronnye seti. Osnovy teorii*. [Neural networks. Fundamentals of the theory]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2010, 496 p.

2. Saymon Khaykin. *Neyronnye seti. Polnyy kurs.* [Neural networks. Full course]. Moscow, Vil'yams Publ., 2006, 1104 p.

3. *GOST R 52633.5–2011. Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Avtomaticheskoe obuchenie neyrosetevykh preobrazovateley biometriya-kod dostupa* [Information protection. Information protection technology. The neural net biometry-code convertor

automatic training]. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 20 p.

4. Richard O. Duda, Peter E. Hart. *Raspoznavanie obrazov i analiz stsen*. [Pattern classification and scene analysis]. Moscow, Mir Publ., 1976, 507 p.

5. Ruud Bolle, Jonathan H. Connell, Sharanth Pankanti, Nalini K. Ratha, Andrew W. Senior. *Rukovodstvo po biometrii* [Guide to Biometrics]. Moscow, Technosphera Publ., 2007, 368 p.

6. Ivanov A. I. [Comparative analysis of competing technologies, biometrics cryptographic authentication identity]. *Zashchita informatsii. Insaid.* 2014, no. 3, p. 3–9. (In Russ.)

7. Efron B. Bootstrap methods: Another look at the Jackknife. Ann. Statistics, 7:1-26, 1979.

8. *GOST R 52633.2–2010. Zashhita informacii. Tehnika zashhity informacii. Trebovanija k formirovaniju sinteticheskih biometricheskih obrazov, prednaznachennyh dlja testirovanija sredstv vysokonadezhnoj biometricheskoj autentifikacii.* [Information protection. Information protection technology. Requirements for creation procedures for bases of synthetic biometric images, intended for high-reliability biometric authentication means testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 24 p.

9. Volchihin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Nazarov I. G, Yazov Y. K. *Nejrosetevaya zashhita personalnyh biometricheskix dannyh.* [Neural network protection of personal biometric data]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012., 160 p.

10. Akhmetov B. S., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Malygin A. Yu. *Algoritmy testirovaniya biometriko-neyrosetevykh mekhanizmov zashchity informatsii.* [Biometrics-testing algorithms neural network information protection mechanisms]. Kazakhstan, Almaty, KazNTU im. Satpaeva Publ., 2013, 152 p.

11. Akhmetov B. S., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Bezyaev A. V., Malygina E. A. *Tekhnologiya ispol'zovaniya bol'shikh neyronnykh setey dlya preobrazovaniya nechetkikh biometricheskikh dannykh v kod klyucha dostupa.* [The technology of using large neural networks to convert the fuzzy biometric data in the key code access]. Kazakhstan, Almaty, TOO “Izdatel'stvo LEM” Publ., 2014, 144 p.

12. *GOST R 52633.1–2009. Zashhita informacii. Tehnika zashhity informacii. Trebovanija k formirovaniju baz estestvennyh biometricheskih obrazov, prednaznachennyh dlja testirovanija sredstv vysokonadezhnoj biometricheskoj autentifikacii.* [Information protection. Information protection technology. Requirements for creation procedures for bases of natural biometric images, intended for high-reliability biometric authentication means testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 24 p.

13. Ivanov A. I. *Biometricheskaya identifikatsiya lichnosti po dinamike podsoznatel'nykh dvizheniy.* [Biometric identification on the dynamics of the unconscious movements]. Penza, Penzenskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2000, 178 p.

14. Kulikov S. V., Sekretov M. V., Zakharov O. S., Ivanov A. I., Mayorov A. V. [Accounting for the "heavy" tails of the distribution of abnormal biometrics all “Aliens” when setting up the nonlinear element of a neuron with multiple discrete states]. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primenenie*, 2012, no. 3, p. 56–59 (In Russ.)

15. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Malygina E. A. [Prospects for the use of artificial neural networks with multi-level quantizers in biometrics technology, neural network authentication]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2013, vol. 28, no. 4, p. 88–89. (In Russ.)

© Качалин С. В., 2014

УДК 519.632

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 73–77

МЕТОД КОЛЛОКАЦИИ С БИКУБИЧЕСКИМ ЭРМИТОВЫМ БАЗИСОМ В ОБЛАСТИ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ГРАНИЦЕЙ

В. А. Киреев

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: kireevvit@gmail.com

Рассматривается метод коллокации, базисными функциями которого выбраны бикубические многочлены Эрмита, применяемый к первой краевой задаче для эллиптического уравнения в области с криволинейной границей. Метод коллокации имеет некоторые преимущества по сравнению с методом конечных элементов Галеркина: не требуется вычислять интегралы для определения коэффициентов матрицы жесткости. Бикубические функции Эрмита принадлежат классу C^1. Для решения задачи строится согласованная с границей сетка. Сетка согласуется с границей так, чтобы два узла в нерегулярных ячейках лежали на криволинейной границе. Это позволяет уменьшить общее количество базисных функций в области. В качестве внутренних узлов коллокации берутся точки множества Гаусса. На криволинейной границе точки коллокации распределяются равномерно. Полученные решения обладают достаточно высоким порядком точности.

Ключевые слова: метод коллокации, бикубический эрмитов базис, эллиптическое уравнение второго порядка, криволинейная граница.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 73–77

HERMITE BICUBIC COLLOCATION METHOD IN DOMAIN WITH CURVILINEAR BOUNDARY

V. A. Kireev

Siberian Federal University
79, Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: kireevvit@gmail.com

In this paper the collocation method with Hermite bicubic basis functions is considered, applied to the first boundary value problem for an elliptic equation in a domain with a curved boundary. The collocation method has some advantages compared with Galerkin finite element method: no need to compute the integrals for the determination of the coefficients of the stiffness matrix. Hermite bicubic functions belongs to the class C^1. The consistent with the boundary mesh is constructed for solving the problem. The grid is consistent with the border so that two nodes in irregular cells were lying on a curvilinear boundary. This approach allows to reduce the total number of basis functions in the domain. As an internal collocation nodes the points of the set of Gauss are taken. The collocation points are distributed evenly on a curvilinear boundary. Under such arrangement, the total number of collocation points equal the total number of basis functions with the given boundary conditions. The problem is reduced to solution of a linear system $Au=f$ where A is a square matrix. The results of numerical experiments of solving Poisson equation with different right sides show that the algorithm of solution has the convergence of high order.

Keywords: collocation method, Hermite bicubic basis, second order elliptic equation, curved boundary.

Широкое применение метода конечных элементов при решении дифференциальных уравнений с частными производными не уменьшает необходимости создания и использования новых методов, которые при более простом алгоритме реализации позволяют получить приемлемые решения с повышенной точностью.

Метод коллокации успешно применялся для численного решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений [1] и уравнений с частными производными [2], в том числе для эллиптических уравнений второго порядка [3]. В них приближенное решение ищется в пространстве кусочно-квадратичных функций на сетках с прямоугольными

или треугольными ячейками. В работах [4; 5] рассматривается метод коллокации и наименьших квадратов. В работе [6] метод рассматривается в областях общего вида.

Метод коллокации с бикубическим эрмитовым базисом имеет некоторые преимущества. Так, по сравнению с методом конечных элементов Галеркина не требуется вычислять интегралы для определения коэффициентов матрицы. Для общего линейного эллиптического оператора с достаточно гладкими коэффициентами и граничными условиями Дирихле, эрмитова коллокация обеспечивает точность $O(h^4)$ в норме L_2, где h – шаг сетки. Эрмитовы элементы более эффективны по сравнению с лагранжевыми элементами, так как размерность систем алгебраических уравнений оказывается меньше при одинаковом порядке аппроксимации [7].

При фиксированном значении одной из переменных бикубическая эрмитова функция и ее первая производная по этой переменной превращаются в одномерные эрмитовы кубические функции относительно другой переменной [8], это дает 16 степеней свободы в каждом прямоугольнике. Стандартный базис в одномерном случае состоит из функций двух типов, интерполирующих значения функции и ее производных соответственно на отрезке $[x_j, x_l]$:

$$\varphi_j = \begin{cases} 1 \text{ в узле } x = x_j \\ 0 \text{ в других узлах} \end{cases}; \psi_l = 0 \text{ во всех узлах};$$
$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial x} = 0 \text{ во всех узлах}; \frac{\partial \psi_l}{\partial x} = \begin{cases} 1 \text{ в узле } x = x_l; \\ 0 \text{ в других узлах.} \end{cases} \quad (1)$$

На эти функции натянуты все кусочно-кубические функции класса C^1. Эрмитово бикубическое пространство есть произведение двух эрмитовых кубических пространств, и четыре параметра в обычных узлах $z = (x_j, y_l)$ приводят к четырем соответствующим базисным функциям:

$$\Phi_1 = \varphi_j(x)\varphi_l(y), \ \ \Phi_2 = \varphi_j(x)\psi_l(y),$$
$$\Phi_3 = \psi_j(x)\varphi_l(y), \ \ \Phi_4 = \psi_j(x)\psi_l(y). \quad (2)$$

Бикубические элементы (конечные элементы с базисом из бикубических эрмитовых элементов) применяются только на прямоугольниках (или, после простого линейного преобразования плоскости, на параллелограммах). На прямоугольной области эрмитов бикубический элемент – один из самых лучших. Его гладкость непосредственно следует из гладкости базиса. Поэтому бикубические элементы можно использовать для уравнений четвертого порядка, пробные функции будут принадлежать H^2. Эрмитово пространство S_h состоит из всех непрерывных кусочно-бикубических функций v, y которых v_x, v_y, v_{xy} непрерывны [9].

Рассмотрим первую краевую задачу для эллиптического уравнения в области Ω:

$$Lu = f, x \in \Omega,$$
$$u(x) = 0, x \in \partial\overline{\Omega}, \quad (3)$$

где $\Omega = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 \le 1; x \ge 0; y \ge 0\}$; $\partial\overline{\Omega}$ – граница; L – линейный эллиптический оператор второго порядка $Lu = -\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$.

На примере решения этой задачи рассмотрим алгоритм метода коллокации. Суть метода заключается в том, что приближенное решение ищется в конечномерном линейном пространстве функций, а неизвестные коэффициенты его разложения по базису пространства определяются из уравнений коллокации и краевых условий. Уравнения коллокаций представляют собой требования того, чтобы приближенное решение удовлетворяло уравнениям исходной дифференциальной задачи в конечном множестве точек области (точках коллокации), в которой ставится данная задача. Для получения краевых условий соответствующие условия задачи записываются в нескольких точках на границе области.

Для аппроксимации решения покроем область согласованной с границей сеткой с прямоугольными ячейками:

$$w_h = \left\{ x_i = \sin\frac{\pi i}{2N}, y_j = \sin\frac{\pi j}{2N}, j = \begin{cases} \overline{0, N}, i = 0 \\ \overline{0, N-i+1}, i = \overline{1, N} \end{cases} \right\}. \quad (4)$$

При этом ячейки сетки делятся на внутренние (регулярные), которые не содержат границы области, и граничные (нерегулярные). Сетка согласуется с границей так, чтобы два узла в нерегулярных ячейках лежали на криволинейной границе. Это позволяет уменьшить общее количество базисных функций в области. Общее число ячеек на такой сетке равно $N_{el} = \frac{N(N+1)}{2}$.

В качестве базисных функций в каждой ячейке задаются бикубические многочлены Эрмита с 16 степенями свободы. В области $[-1,1]\times[-1,1]$ они определяются следующим образом [10]:

$$\varphi_i(z_i) = 1, \varphi_i(z_j) = 0, i \ne j;$$
$$\frac{\partial \varphi_{xi}(z_i)}{\partial x} = 1, \frac{\partial \varphi_{xi}(z_j)}{\partial x} = 0, i \ne j;$$
$$\frac{\partial \varphi_{yi}(z_i)}{\partial y} = 1, \frac{\partial \varphi_{yi}(z_j)}{\partial y} = 0, i \ne j;$$
$$\frac{\partial^2 \varphi_{xyi}(z_i)}{\partial x \partial y} = 1, \frac{\partial^2 \varphi_{xyi}(z_j)}{\partial x \partial y} = 0, i \ne j,$$
$$\frac{\partial \varphi_{xyi}(z_j)}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varphi_{xyi}(z_j)}{\partial y} = 0, i, j = 1, 2, 3, 4.$$

Для каждой ячейки точки коллокации берутся в нулях полинома Лежандра $P_2\left(\frac{2x - x_i - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right)$, чтобы достичь наибольшей возможной точности [11]:

$$\xi^x_{i,\mathrm{m}} = x_{c,i} \pm \frac{\sqrt{3}}{6} h_{x,i}, \xi^y_{\mathrm{j,m}} = y_{c,j} \pm \frac{\sqrt{3}}{6} h_{y,j}, m = 1, 2,$$

где $x_{c,i} = \dfrac{x_i + x_{i-1}}{2}$, $y_{c,j} = \dfrac{y_j + y_{j-1}}{2}$, $h_{x,i} = x_i - x_{i-1}$, $h_{y,j} = y_j - y_{j-1}$, $i = 1, \ldots, k$, $j = 1, \ldots, 1$.

При этом для прямоугольной области верна оценка $\left\| u - u^h \right\|_{L_2} \le Ch^4 \left\| u \right\|_{H^4(\Omega)}$ [12], где $H^m(\Omega)$ обозначает пространство Соболева с нормой

$$\left\| v \right\|_{H^m(\Omega)} = \left(\sum_{0 \le i+j \le m} \left\| \frac{\partial^{i+j} v}{\partial x^i \partial y^i} \right\|^2_{L_2(\Omega)} \right)^{1/2}.$$

Оценки в других нормах даны в работе [13].

В каждой граничной ячейке добавляются по 3 точки коллокации равномерно на границе:

$$\xi^x_{i,k+4} = \cos\left(\frac{\pi}{2N} \left(i + \frac{k}{4} \right) \right),$$
$$\xi^y_{j,k+4} = \sin\left(\frac{\pi}{2N} \left(j + \frac{k}{4} \right) \right), \quad k = 1, 2, 3. \tag{5}$$

При такой расстановке общее число точек коллокации совпадает с общим числом базисных функций с учетом граничных условий и равно $N_\varphi = 2N^2 + 5N$. На рис. 1 изображена построенная сетка с точками коллокации. Узлы сетки обозначены жирными точками, точки коллокации – крестами.

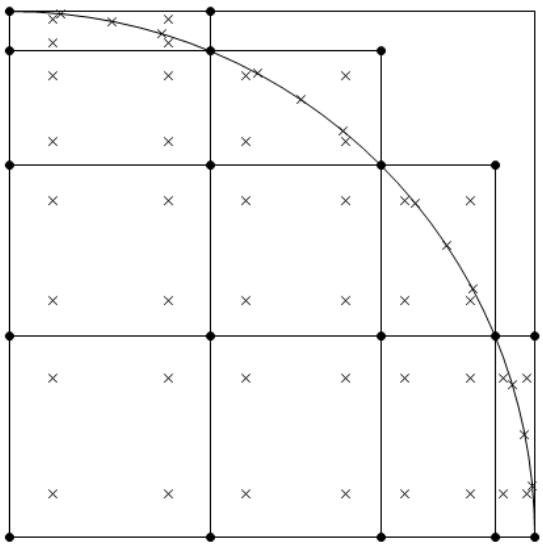


Рис. 1. Согласованная сетка и точки коллокации

Построенный метод коллокации аппроксимирует неизвестную функцию u функцией U в пространстве конечномерных функций V. В построенном базисе эрмитовых бикубических функций функция U равна:

$$u^h(x, y) = \sum_{n=1}^{n_G} u^h_n \Phi_n(x, y), \tag{6}$$

где Φ_n – эрмитовы бикубические базисные функции; n_G – число точек коллокации; U_n – коэффициенты. Задача эрмитовой коллокации состоит в том, чтобы найти $U \in V$, удовлетворяющее (1) в точках коллокации, т. е.:

$$Lu^h\left(\xi^x_{\mathrm{i,m}}, \xi^y_{\mathrm{j,m}}\right) = f\left(\xi^x_{\mathrm{i,m}}, \xi^y_{\mathrm{j,m}}\right), \left(\xi^x_{\mathrm{i,m}}, \xi^y_{\mathrm{j,m}}\right) \in \Omega;$$
$$u^h\left(\xi^x_{\mathrm{i,m}}, \xi^y_{\mathrm{j,m}}\right) = 0, \left(\xi^x_{\mathrm{i,m}}, \xi^y_{\mathrm{j,m}}\right) \in \partial\bar{\Omega}. \tag{7}$$

Решение задачи сводится к решению линейной системы $Au = f$, где элементы матрицы

$$A[i, j] = \begin{cases} L\Phi_j(x_i, y_i), (x_i, y_i) \in \Omega \\ \Phi_j(x_i, y_i), (x_i, y_i) \in \partial\bar{\Omega} \end{cases}$$

вектор правой части $f[i] = \begin{cases} f(x_i, y_i), (x_i, y_i) \in \Omega \\ 0, (x_i, y_i) \in \partial\bar{\Omega} \end{cases}$.

Для исследования порядка сходимости приближенного решения $U(x,y)$ к точному проведены расчеты на последовательности сеток при $h \to 0$. В табл. 1 приведены результаты численных экспериментов с решением

$$u(x, y) = \sin\left(1 - x^2 - y^2\right) xy, \tag{8}$$

которое удовлетворяет уравнению Пуассона (3) с правой частью

$$f(x, y) = 4xy(3\cos(1 - x^2 - y^2) - (x^2 + y^2)\sin(1 - x^2 - y^2)).$$

Таблица 1

Значения погрешности в норме L_2

N	N_{el}	N_φ	$h_{\max}$	$\delta_h = \left\| u - u^h \right\|$	δ_{2h} / δ_h	$\log_2(\delta_{2h} / \delta_h)$
3	6	33	0,5	$4{,}93 \times 10^{-4}$		
6	21	102	0,2588	$2{,}25 \times 10^{-5}$	21,9	4,45
12	78	348	0,1305	$1{,}18 \times 10^{-6}$	19,1	4,25
24	300	1272	0,0654	$6{,}32 \times 10^{-8}$	18,7	4,22
48	1176	4848	0,0327	$3{,}53 \times 10^{-9}$	17,9	4,16

Численные эксперименты с другими функциями, удовлетворяющими граничным условиям, свидетельствуют о том, что порядок сходимости приближенного решения к точному при $h \to 0$ здесь не хуже 4. Порядок сходимости α вычисляется методом наименьших квадратов из $\left\| u - u^h \right\|_{L_2} \le Ch^\alpha_{\max} \left\| u \right\|_{H^4(\Omega)}$, где $h_{\max}$ – максимальный линейный шаг по всем ячейкам сетки (табл. 2, рис. 2).

Таблица 2

Порядок сходимости для различных функций

Функция	Порядок сходимости α
$u_1 = \sin\left(1 - x^2 - y^2\right) xy$	4,2779
$u_2 = \left(1 - x^2 - y^2\right) \sin(\pi x) \sin(\pi y)$	4,2169
$u_3 = \left(\left(1 - x^2 - y^2\right) xy\right)^2$	4,4270
$u_4 = \left(1 - x^2 - y^2\right) \sin(xy)$	4,3803
$u_5 = e^{\left(1 - x^2 - y^2\right) xy} - 1$	4,3953

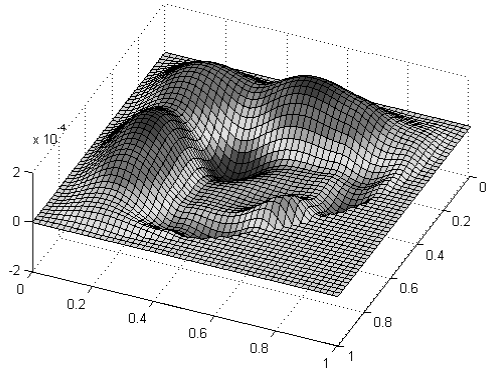


Рис. 2. Распределение ошибки при разбиении на 10 ячеек

Результаты численных экспериментов показывают, что данный алгоритм обладает сходимостью повышенного порядка. Согласование узлов ячеек расчетной области с областью определения задачи позволяет увеличить теоретический порядок сходимости метода и уменьшить размерность пространства базисных функций. При этом по сравнению с методами Галеркина и Ритца метод коллокации более прост в реализации, так как нет скалярных произведений, а значит, не нужно интегрировать. Вместе с этим эффективно используются бикубические эрмитовы базисные функции, так как по сравнению с лагранжевыми они показывают больший порядок аппроксимации.

Библиографические ссылки

1. Russell R. D., Shampine L. F. A collocation method for boundary value problems // Numer. Math. 1972. Vol. 19. P. 1–28.

2. Leyk Z. A Co-collocation-like method for elliptic equations on rectangular regions // Australian Math. Soc. B. Appl. Math. 1997. Vol. 38. P. 368–387.

3. Слепцов А. Г. Коллокационно-сеточное решение эллиптических краевых задач // Моделирование в механике. 1987. Т. 5(22), № 2. С. 101–126.

4. Исаев В. И., Шапеев В. П., Идимешев С. В. Варианты метода коллокаций и наименьших квадратов повышенной точности для численного решения уравнения Пуассона // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 1. С. 85–93.

5. Беляев В. В., Шапеев В. П. Метод коллокаций и наименьших квадратов на адаптивных сетках в области с криволинейной границей // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5, № 4. С. 13–21.

6. Houstis E. N., Mitchell W. F., Rice J. R. Collocation Software for Second-Order Elliptic Partial Differential Equations // ACM Transactions on Mathematical Software. 1985. Vol. 11, no. 4. P. 379–412.

7. Gileva L., Shaydurov V., Dobronets B. The triangular Hermite finite element complementing the Bogner-Fox-Schmit rectangle // Applied Mathematics. 2013. Vol. 5, no. 12A. P. 50–56.

8. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. М. : Наука, 1980. 352 с.

9. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М. : Мир, 1977. 351 с.

10. Dobronets B. S. Combined bicubic Hermite finite element method // The First China-Russia Conference on Numerical Algebra with Applications in Radiative Hydrodynamics. China, (October 16–18, Beijing). 2012. 19 p.

11. Mateescu G., Ribbens C. J., Watson L. T. A Domain Decomposition Preconditioner for Hermite Collocation Problems // Computer Science, Virginia Tech : Technical Report TR-02-02, 2002.

12. Prenter P. M., Russell. R. D. Orthogonal collocation for elliptic partial differential equations // SIAM J. Numer. Anal. 1976. Vol. 13, no. 6. P. 923–939.

13. Bialecki B., Xiao-Chuan C. H1-norm error bounds for piecewise Hermite bicubic orthogonal spline collocation schemes for elliptic boundary value problems // SIAM J. Numer. Anal. 1994. Vol. 31, no. 4. P. 1128–1146.

References

1. Russell R. D., Shampine L. F. A collocation method for boundary value problems. *Numer. Math*, 1972, vol. 19, p. 1–28.

2. Leyk Z. A Co-collocation-like method for elliptic equations on rectangular regions. *Australian Math. Soc. B. Appl. Math*, 1997, vol. 38, p. 368–387.

3. Sleptsov A. G. [Collocation-grid solution of an elliptic boundary value problems]. *Modelirovanie v mekhanike*. 1987, vol. 5(22), no. 2, p. 101–126. (In Russ.).

4. Isaev V. I., Shapeev V. P., Idimeshev S. V. [Variants of the collocation and least squares method of increased accuracy for the numerical solution of the Poisson equation]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2011, vol. 16, no. 1, p. 85–93. (In Russ.).

5. Belyaev V. V., Shapeev V. P. [Collocation and least squares method on adaptive grids in the areas with curvilinear boundary]. *Vychislitel'nye tekhnologii.* 2000, vol. 5, no. 4, p. 13–21. (In Russ.).

6. Houstis E. N., Mitchell W. F., Rice J. R. Collocation Software for Second-Order Elliptic Partial Differential Equations. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1985, vol. 11, no. 4, p. 379–412.

7. Gileva L., Shaydurov V., Dobronets B. The triangular Hermite finite element complementing the Bogner-Fox-Schmit rectangle. *Applied Mathematics*. 2013, vol. 5, no. 12A, p. 50–56.

8. Zav'yalov. Yu. S., Kvasov B. I., Miroshnichenko V. L. *Metody splayn-funktsiy* [Spline-function methods]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 352 p.

9. Strang G., Fix. G. J. *An analysis of the finite element method*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., 1973.

10. Dobronets B. S. Combined bicubic Hermite finite element method. The First China-Russia Conference on Numerical Algebra with Applications in Radiative Hydrodynamics.Beijing, China, October 16–18, 2012, p. 19.

11. Mateescu G., Ribbens C. J., Watson L. T. A Domain Decomposition Preconditioner for Hermite Collocation Problems. *Computer Science, Virginia Tech,* Technical Report TR-02-02, 2002.

12. Prenter P. M., Russell. R. D. Orthogonal collocation for elliptic partial differential equations. *SIAM J. Numer. Anal.*, 1976, vol. 13, no. 6, p. 923–939.

13. Bialecki B., Xiao-Chuan C. H1-norm error bounds for piecewise Hermite bicubic orthogonal spline collocation schemes for elliptic boundary value problems. *SIAM J. Numer. Anal.,* 1994, vol. 31, no. 4, p. 1128–1146.

© Киреев В. А., 2014

УДК 004.41(075.8)

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 78–92

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: МНОГОЭТАПНОСТЬ И АРХИТЕКТУРНЫЙ АСПЕКТ

И. В. Ковалев

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

В рамках обзора показано, что оценка и анализ надежности программного обеспечения (ПО) должны осуществляться на каждом шаге создания отказоустойчивых программ. В любом случае очень важно использовать как можно больше априорной информации перед началом каждой фазы создания ПО, так как это обеспечит наиболее приемлемые и точные результаты. Так как нет единого подхода, методики и параметров для оценки надежности ПО, в настоящее время существует множество моделей и алгоритмов, проверенных на практике, но имеющих ряд недостатков. Проводится анализ методов, моделей и методологий в области создания надежного, отказоустойчивого ПО. Делается попытка систематизировать и унифицировать существующие методологии. Учитывается многоэтапность создания ПО и архитектурный аспект в рамках всего жизненного цикла отказоустойчивого программного обеспечения.

Ключевые слова: программное обеспечение, надежность, программная архитектура, этап разработки, отказоустойчивость, жизненный цикл.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 78–92

ANALYSIS OF PROBLEMS IN THE RESEARCH AREA OF SOFTWARE RELIABILITY: A LOT OF STAGES AND ARCHITECTURAL ASPECT

I. V. Kovalev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russia
E-mail: kovalev.fsu@mail.ru

In the survey, it is shown that estimation and reliability analysis should be performed at each step, create a failover. Due to the fact that there is no single approach, methods and parameters for estimating the reliability of Software*, there are many models and algorithms, tested virtually, but has several disadvantages. The main drawback of all models is "specialization". Models are always tied to any one phase of software development, and sometimes have a purely theoretical value due to the fact that they must be used the data obtained at other stages of development, and the authors of such models usually consider this fact of secondary importance.*

The most promising approach is aimed at creating some hybrid model, which includes all the advantages of a well-validated models and algorithms. Existing models and algorithms need to be modified so that the output of one model became the input for the other; to provide a unifying parameters, units of measure conversion, normalization of data and satisfying the current requirements and trends, such as object-oriented analysis and programming. From this review we can see that it is very important to use as much a priori information before beginning each phase of creation, as this will provide the most appropriate and accurate results.

The analysis of methods, models and methodologies in the field of creation of reliable, fault-tolerant (Software) is carried out. Attempts to systematize and unify the existing methodology are made. The multiple steps involved in the creation and architectural aspect within the entire life-cycle fault-tolerant software are taken into account.

Keywords: Software reliability, software architecture, development stage, resiliency, life cycle.

Интерес к оцениванию надежности программного обеспечения (ПО) возник одновременно с появлением программ. Он был вызван естественным стремлением получить традиционную вероятностную оценку надежности технического устройства (ЭВМ или персонального компьютера), работа которого в основном и предназначалась для функционирования ПО. Последнее было определено как одна из составляющих

частей машины, поэтому подход к оцениванию надежности программной части первоначально мало отличался от оценивания надежности техники и заключался в переносе известных статистических методов классической теории надежности на новую почву, образовав ее отдельную ветвь – теорию надежности ПО [1–3]. В целом этот подход сохранился до сегодняшнего дня. Однако по мере развития вычислительной техники пришло четкое понимание того, что ПО не просто составная часть вычислительной техники. В современных условиях развития цифровой техники специализированное ПО перестало быть принадлежностью одной вычислительной системы (как это было раньше), а стало использоваться на сотнях и тысячах аналогичных компьютеров (в основном персональных). Даже если не касаться вопросов информационной безопасности, проблема обеспечения устойчивого функционирования расчетных программ, выявления их ошибок сегодня крайне остро стоит перед разработчиками [4].

За прошедшие десятилетия было создано множество методов, методик и моделей исследования надежности ПО. Однако, к сожалению, единого подхода к решению этой проблемы предложено не было и, по-видимому, в ближайшее время не предвидится. Тем не менее при разработке сложных программных систем их создатели стараются в той или иной степени получить оценку надежности ПО. Более правильный подход заключается в последовательном оценивании надежности программ на каждом этапе разработки. Основная сложность при использовании статистических методов заключается в отсутствии достаточного количества исходных данных. Динамика выявления ошибок должна тщательно фиксироваться и обрабатываться. Важной проблемой является степень детализации элемента расчета надежности. Выявить все связи обработки информации (как это порой предлагается) даже для достаточно несложной программы практически нереально. Исходя из этого, детализация элементов расчета надежности (условно называемых программными модулями) должна ограничиваться законченными программными образованиями, которые, взаимодействуя между собой, составляют более сложное объединение (комплекс), надежность которого нас интересует. При этом допускается, что надежность самой вычислительной техники, операционной системы (ОС) и среды программирования полная, нас интересует лишь надежность функционирования специальных программных средств, решающих основную целевую задачу системы.

В данной работе проводится анализ методов, моделей и методологий в области создания надежного, отказоустойчивого ПО; делается попытка систематизировать и унифицировать существующие методологии; учитывается многоэтапность создания ПО и архитектурный аспект в рамках всего жизненного цикла гарантоспособного программного обеспечения.

В результате анализа многих работ из области исследования надежности ПО был выявлен широкий ряд проблем, основной причиной которого является отсутствие единого стандарта в области отказоустойчивого ПО. Это показывает анализ многих работ как зарубежных исследователей [5–15], так и отечественных авторов [1; 2; 16–26]. Среди множества различных институтов и организаций (ISREE, IEEE, NASA), независимых исследователей проблем надежности ПО не существует единой терминологии, единых параметров и показателей надежности программ, а также методологии разработки отказоустойчивого ПО [3; 27–48].

Можно выделить три основные группы проблем в данной области:

– отсутствие единой методологии создания отказоустойчивого ПО;

– отсутствие единой методологии тестирования отказоустойчивого ПО;

– отсутствие единого подхода к анализу проблемной области.

Касаясь проблем терминологии, отметим недостатки существующих определений, когда программное обеспечение содержит ошибку [49]:

1. Поведение ПО не соответствует спецификациям.

Недостатки: неявно предполагается, что спецификации корректны. Подготовка спецификаций – один из основных источников ошибок. Если поведение программного продукта не соответствует его спецификациям, ошибка, вероятно, имеется. Однако если система ведёт себя в соответствии со спецификациями, мы не можем утверждать, что она не содержит ошибок.

2. Поведение ПО не соответствует спецификациям при использовании в установленных при разработке пределах.

Недостатки: если система случайно используется в непредусмотренной ситуации, её поведение должно оставаться разумным. Если это не так, она содержит ошибку.

3. Программное обеспечение ведёт себя не в соответствии с официальной документацией и поставленными пользователю спецификациями.

Недостатки: ошибки могут содержаться и в программе, и в спецификациях, или в руководстве описана только ожидаемая и планируемая работа с системой.

4. Система не способна действовать в соответствии с исходной спецификацией и перечнем требований пользователя.

Это утверждение тоже не лишено недостатков, поскольку письменные требования пользователя редко детализированы настолько, чтобы описывать желаемое поведение программного обеспечения при всех мыслимых обстоятельствах.

Окончательное определение: в программном обеспечении имеется ошибка, если оно не выполняет того, что пользователю разумно от него ожидать. Отказ программного обеспечения – это проявление ошибки в нём.

Термины «ошибка», «сбой» и «дефект» часто используются без разделения по смыслу. В ПО «ошибка» – это действия программиста, которые

приводят к дефектам в ПО. «Дефект» в ПО влечет за собой сбои во время исполнения кода [3]. «Сбой» – отклонение выхода системы от желаемого при выполнении кода.

Дефект влечет за собой сбой только тогда, когда выполняется код, содержащий ошибку, и распространяется до выхода системы. Уровень тестируемости дефекта определяется как вероятность обнаружения сбоя на случайно выбранном выходе.

Уровни сбоя: катастрофичный, высокий, средний, низкий, незначительный. Определения этих уровней меняются от системы к системе.

Простой или «зависание» – особый вид сбоя, зависящий от сбоя как в аппаратной части, так и в программной части системы или же от некорректных действий пользователя.

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 [5]. Основной недостаток такого определения – это то, что в нем не учтено различие между ошибками разных типов. Надежность ПО определяется как вероятность функционирования без ошибок за определенный период времени в определенной операционной системе. Для большинства разработчиков надежность определяется как корректность ПО, т. е. количество ошибок, которое надо исправить во время теста.

Существует и другое определение надежности – операционная (транзакционная) надежность. Операционная надежность – это способность системы или компонента выполнять требуемые функции при определенных условиях в рамках транзакции. Широко используется в системах обработки и хранения информации в базах данных [22; 26]. Далее будем использовать понятия классической и транзакционной надежности в зависимости от места их применения и используемой модели надежности.

Следует отметить, что при оценке надежности ПО существуют и другие определения, имеющие немаловажное значение. Одним из таких параметров является время. Время можно разделить на два типа: календарное время и процессорное время. Процессорное время преобразуется в календарное для сравнения параметров ПО, используемого на разном аппаратном обеспечении и в разных операционных системах. При комбинировании различных моделей оценки надежности следует учитывать тот факт, что понятия времени в них могут различаться. Такие модели надо унифицировать, приводя их единому пониманию времени, вводя соответствующие формулы с коэффициентами пересчета времени.

Среди множества работ из области оценки параметров надежности ПО можно выявить несколько десятков подходов к измерению или методам оценки тех или иных количественных показателей, характеризующих надежность [50]. Отметим основные из них [51–53].

Надежность – имеет обозначение R (reliability) и измеряется как вероятность невозникновения сбоя. Надежность используется практически во всех моделях как основной показатель.

Среднее время появления сбоя – имеет аббревиатуру MTTF (Mean Time To Failure) и измеряет время между двумя последовательными сбоями.

Интенсивность сбоев – величина, обратная MTTF, определяет количество сбоев в единицу времени.

Среднее время простоя (TR) – величина, определяющая время, затрачиваемое на выявление, устранение и восстановление системы или компонента системы после сбоя.

Коэффициент готовности системы (S) – определяется как отношение разности среднего времени появления сбоя и среднего времени простоя системы к среднему времени появления сбоя.

Количество оставшихся ошибок в коде ПО – используется при разработке ПО. Показывает количество ошибок в коде на каждую тысячу строк исходного кода.

Плотность ошибок в коде – обычно измеряется как количество ошибок на тысячу строк исходного кода [37].

Представим следующую классификацию существующих моделей, методов и алгоритмов оценки надежности программных средств.

Классификация по оптимизируемым параметрам надежности. К этому классу относятся модели оптимизации сроков и стоимости проекта. Такие модели используются для минимизации сроков разработки и стоимости проекта при сохранении должного уровня надежности ПО. Как правило, используются на ранних стадиях жизненного цикла разработки ПО [33; 40; 46].

Модели выбора оптимального набора мультиверсий в *N*-версионном ПО используются разработчиками для поиска множества недоминируемых решений, удовлетворяющих критерию максимума надежности при минимальных затратах [12; 20–24; 28; 36–38].

Классификация по используемым формальным методам. По формальным методам модели делятся следующим образом:

1. Формальные математические модели – используют какую-либо математическую функцию для экстраполяции параметров надежности, например, для оценки плотности ошибок в коде используют экспоненциальную функцию.

2. Модели поведения ПО – делятся на статистические модели и модели ветвления хода выполнения (path-based) [34].

3. Модели ветвления – используют описание внутренней структуры архитектуры ПО для оценки надежности, при этом описываются все возможные пути выполнения кода и оценивается надежность каждого пути.

4. Статистические модели, использующие исторические данные – аналогично формальным математическим моделям используют статистическую

функцию для экстраполяции параметров надежности. Самые распространенные модели – это модели, использующие регрессию, с помощью которых по накопленным статистическим данным можно достаточно точно оценивать параметры надежности.

5. Марковские цепи – используют для описания поведения структуры программного обеспечения, в таких моделях надежность ПО рассматривается как матрица вероятностей сбоев компонент архитектуры [23; 24; 34].

6. Нейросети – используются для экстраполяции параметров надежности. Для обучения нейросетей используют исторические данные или выходные данные других моделей [54].

Классы моделей по их месту в процессе разработки можно представить следующим образом [55–60]:

– модели, использующиеся на стадии анализа;

– модели, использующиеся на стадии дизайна архитектуры;

– модели, использующиеся на стадии создания кода;

– модели, использующиеся на стадии тестирования;

– модели, использующиеся на стадии опытной эксплуатации;

– модели, использующиеся на стадии промышленной эксплуатации.

Известен также ряд моделей, использующих информацию об ошибках в коде, которые используются для предсказания количества ошибок в коде и, следовательно, зависимости надежности от количества строк в коде, оценки времени исправления оставшихся ошибок в коде. Модели, использующие информацию о внутренней структуре ПО, вычисляют оценку надежности как ПО, состоящего из компонент, или используются для моделирования структуры ПО как множества путей ветвления хода выполнения программы. Модели, использующие искусственную эмуляцию ошибок, оценивают надежность путем прямого теста ПО с искусственным внедрением ошибочных данных или эмуляцией сбоев в аппаратном обеспечении.

Отдельный класс моделей – это гибридные модели. Они используют различные комбинации из всех вышеперечисленных классов моделей. Могут использоваться для оценки любых параметров надежности на разных этапах жизненного цикла программного обеспечения.

Методы и средства обеспечения надежности программного обеспечения. Методы проектирования надежного программного обеспечения можно разбить на следующие группы:

1) предупреждение ошибок – методы, позволяющие минимизировать или исключить появление ошибки;

2) обнаружение ошибок – методы, направленные на разработку дополнительных функций программного обеспечения, помогающих выявить ошибки;

3) устойчивость к ошибкам – дополнительные функции программного обеспечения, предназначенные для исправления ошибок и их последствий, обеспечивающие функционирование системы при наличии ошибок.

Методы предупреждения ошибок концентрируются на отдельных этапах процесса проектирования программного обеспечения и включают в себя:

– методы достижения большей точности при преобразовании информации;

– методы улучшения обмена информацией;

– методы немедленного обнаружения и устранения ошибок.

Методы обнаружения ошибок базируются на введении в программное обеспечение системы различных видов избыточности:

1. Временная избыточность. Использование части производительности аппаратных средств для контроля исполнения и восстановления работоспособности ПО после сбоя.

2. Информационная избыточность. Дублирование части данных информационной системы для обеспечения надёжности и контроля достоверности данных.

3. Программная избыточность. Включает в себя: «взаимное недоверие» – компоненты системы проектируются, исходя из предположения, что другие компоненты и исходные данные содержат ошибки, и должны пытаться их обнаружить; немедленное обнаружение и регистрацию ошибок; выполнение одинаковых функций разными модулями системы и сопоставление результатов обработки; контроль и восстановление данных с использованием других видов избыточности.

Методы обеспечения устойчивости к ошибкам направлены на минимизацию ущерба, вызванного появлением ошибок, и включают в себя:

– обработку сбоев аппаратуры;

– повторное выполнение операций;

– динамическое изменение конфигурации;

– сокращенное обслуживание в случае отказа отдельных функций системы;

– копирование и восстановление данных;

– изоляцию ошибок.

Рассмотрим распределение моделей и методов оценки параметров надежности по фазам жизненного цикла разработки программных средств. В общем случае жизненный цикл ПО можно разделить на следующие фазы [1–3; 16–19].

1. Концептуальная фаза. Построение общей концепции будущей информационно-управляющей системы. Аналитики и эксперты проблемной области изучают поставленные задачи. Результатом фазы является общая концепция построения системы.

2. Определение требований. На данном этапе разработчики взаимодействуют с заказчиком для выявления потребностей и требований к системе. На этом этапе делается незначительное количество ошибок. Изменение требований на более поздних стадиях может повлечь появление большого количества ошибок.

3. Дизайн архитектуры. Строится спецификация взаимосвязей модулей таким образом, что каждый модуль четко разделен, разрабатывается и тестируется независимо. Дизайн может пересматриваться для выявления ошибок.

4. Кодирование. На данном этапе пишется реальный код программы, как правило, на языке высокого уровня. Иногда возможно использование низкоуровневых языков программирования для достижения высокой производительности или для сопряжения с нестандартной аппаратурой. Код постоянно анализируется на предмет наличия ошибок.

5. Тестирование. Эта фаза одна из самых важных и трудоемких. Может занимать от 30 до 60 % временных и материальных ресурсов проекта. Обычно разделяется на несколько последовательных фаз:

5.1. Тестирование модулей. На этом этапе каждый модуль тестируется отдельно, делаются модификации модуля для исправления ошибок. Каждый модуль значительно меньше всей программы и может быть более тщательно протестирован.

5.2. Групповое тестирование. Модули группируются на подсистемы. Подсистемы тестируются независимо. Позволяет выявить ошибки в интерфейсах между модулями. Добавление и удаление модулей из подсистемы позволяет проще идентифицировать ошибки.

5.3. Тестирование системы. Тестируется вся система полностью. Отладка происходит до тех пор, пока не будет достигнут какой-либо критерий. Цель данного этапа – определить максимально возможное количество ошибок за минимальное время.

5.4. Тестирование приемлемости. Цель – оценка производительности и надежности в определенной операционной системе. Собирается информация о том, как пользователи будут использовать систему. Это называется альфа-тестированием. Могут привлекаться реальные пользователи – в этом случае способ называется бета-тестированием.

6. Использование. Система эксплуатируется, и ошибки, выявленные пользователями, не исправляются, пока не выйдет новая версия ПО.

7. Регрессивное тестирование. Новая версия тестируется на работоспособность и проверяется, не уменьшилась ли (регрессировала) надежность ПО.

Наиболее важными являются фазы, которые вносят наибольший вклад в надежность ПО: фаза дизайна архитектуры, фаза кодирования, фаза тестирования компонент и фаза тестирования системы.

Фаза дизайна архитектуры программного обеспечения. Широкое применение средств вычислительной техники породило понятие «архитектура ПО», которое, несмотря на свою распространенность, воспринимается, как правило, интуитивно и употребляется чаще всего при сравнении вычислительных машин.

Под архитектурой ПО, как и вообще любых других средств обработки информации, понимают в узком смысле совокупность их свойств и характеристик, призванных удовлетворить запросы пользователей. В более широком смысле архитектура ПО – это обобщенная модель информационной системы, достаточная для понимания принципов ее функционирования.

Разработка архитектуры – это процесс разбиения большой системы на более мелкие части. Для обозначения этих частей придумано множество названий: программы, компоненты, подсистемы и уровни абстракции. Процесс разработки архитектуры – необходимый шаг в процессе проектирования ПО или комплекса программ (КП). КП представляет собой набор решений множества различных, но связанных между собой задач.

Надежность архитектуры включает в себя надежность индивидуальных элементов. Сбой отдельного элемента приводит к неработоспособности этого и возможно других элементов, но не всей системы в целом. Сбой в системе или ее функциях может выразиться в периоде простоя системы. Период простоя системы определятся как отрезок времени, на котором система или ее часть не может выполнять функции. Период простоя системы приводит к резкому снижению производительности, поэтому уменьшение времени простоя системы является одним из наиболее важных факторов при разработке архитектур распределенного программного обеспечения.

Основные понятия теории надежности комплексов программ базируются на понятиях теории надежности, первоначально развивавшейся применительно к аппаратным комплексам, однако имеются существенные различия в принципах обеспечения надежности программного обеспечения и других технических систем.

В рамках определенного программного проекта трудоемкость создания и возможность достижения заданных параметров надежности определяются, с одной стороны, объемами выделенных ресурсов, а с другой – технологическими средствами, используемыми при проектировании ПО [60].

Для достижения низких показателей сбоев для компонентов аппаратного обеспечения можно увеличить надежность дублированием наиболее критических компонентов архитектуры. В некоторых случаях при отказе компонента его функции могут выполняться дублирующим компонентом. Надежность программного обеспечения нельзя увеличить таким методом, поскольку дублирование компонентов ПО приведет также к дублированию его ошибок. Существуют методы, использующие разнообразие в спецификации, разработке, внедрении и тестировании.

Эксперименты показывают, что применение избыточности на самых ранних этапах разработки, насколько это возможно, уменьшает вероятность появления ошибок. Надежное ПО можно создать с помощью тщательной разработки архитектуры и выявления ошибок в компонентах, которые больше всего оказывают влияние на надежность системы. Эти компоненты определяются как наиболее часто

используемые или архитектурно связанные с множеством других компонентов, влияя, таким образом, на их надежность.

Модульная организация предполагает деление ПО на функционально завершенные части (модули), унификацию связей между ними и установление иерархии взаимодействия компонентов, которая определяется последовательностью их вызова. Вызов осуществляется передачей управления от вызывающего модуля к вызываемому, который по окончании выполнения возвращает управление вызывающему модулю. Вызов группы программ осуществляется передачей управления диспетчеру группы программ более низкого уровня иерархии, входящей в данный КП.

Основные методы современной практической разработки программных комплексов базируются на функциональной декомпозиции с использованием модульно-иерархических принципов [26]. При этом на каждом иерархическом уровне ограничивается сложность компонентов и их связей. В результате общая сложность системы растет значительно медленнее с возрастанием объема задач, чем при неструктурированном проектировании. Эти принципы привели к созданию структурного программирования как стандартного способа построения модульных программ.

Определение модульной программы опирается на ограничения по размерам программ и на понятие их независимости, т. е. модульная программа должна состоять из модулей конечных размеров, которые имеют точку входа и точку выхода. Преимущества модульности состоят в упрощении проектирования и модификации программы, облегчении тестирования и отладки программ, возможности создания библиотеки стандартных модулей и т. д. Недостатки – увеличение времени исполнения программ и объема памяти, усложнение межмодульного взаимодействия – в целом окупаются выигрышем, получаемым от сокращения срока разработки и упрощения сопровождения программ.

Основным средством реализации модульности программ является структурное программирование. Целями структурного программирования служат повышение читабельности и ясности программ, увеличение производительности работы программистов и упрощение процесса разработки. Само понятие структурного программирования представляет собой некоторые принципы написания программ в соответствии с совокупностью определенных правил. Согласно «структурной теореме» для построения любой программы необходимы три основные базовые конструкции:

1) простая вычислительная последовательность, означающая, что два действия должны выполняться одно за другим;

2) альтернатива или ветвление, при котором на основе проверки некоторого условия делается выбор между двумя возможными путями;

3) цикл или итерация, обеспечивающая повторное выполнение некоторой последовательности действий.

Применяемый при структурном программировании сквозной структурный контроль необходим для обнаружения и исправления ошибок на ранних стадиях проектирования, пока стоимость исправления ошибок минимальна, а последствия их наличия незначительны. Такой контроль обеспечивается регулярным обсуждением принятых решений всеми взаимодействующими разработчиками. Кроме того, базовые структуры, унификация правил взаимодействия компонентов и заведомо известная последовательность их разработки в порядке соподчиненности создают предпосылки для автоматизации процесса структурного контроля.

Модульность построения приводит к использованию иерархической структуры взаимодействия модулей программы. Иерархическая схема, отражая функции модулей, одновременно показывает структуру связей между ними. Иерархические структуры системы характеризуются, с одной стороны, вертикальным управлением, когда модули верхнего уровня имеют право вмешательства и координирования работы модулей нижнего уровня. С другой стороны, действия модулей верхнего уровня зависят от информации, полученной в результате функционирования нижних иерархических уровней. Таким образом, сверху вниз идут в основном управляющие воздействия, а снизу вверх – информация о соответствующих решениях и переменных.

Архитектура программного обеспечения формируется из ряда компонентов, соединенных различными средствами зависимости и связи. Архитектурный компонент может быть определен поразному в зависимости от архитектурного подхода и степени подробности описания архитектуры. Наиболее критическими компонентами архитектуры программного обеспечения являются компоненты, к которым происходят частые обращения, или компоненты архитектурно связанные (через зависимости и связи) со множеством других компонентов, влияя таким образом на их надежность. Процесс – компонент, который занимает слот в таблице процессов процессора. Процессом может также быть компонент, который управляется как процесс через использование примитивов операционной системы. Модуль состоит из нескольких файлов, логически связанных и образующих часть функционального кода. Размер модуля может изменяться в широком диапазоне и зависит от созданного прикладного программного обеспечения.

В зависимости от свойств архитектуры компоненты программного обеспечения, а также их связи и зависимости могут быть определены поразному. Рассматриваются следующие свойства архитектуры:

– статическая и динамическая зависимость компонентов;
– интерфейсы компонентов;
– связь и управление;
– загруженность системы.

Архитектура ПО со статической зависимостью компонентов формируется как дерево систем, подсистем, модулей и функций. При этом подходе неисправность в узле более высокого уровня может привести к недоступности узлов более низких уровней. Эта архитектура со статической зависимостью компонентов не включает зависимость между динамическими процессами, таким образом, информации относительно использования компонентов ПО в течение обработки запросов пользователей, администрирования и сопровождения модель не дает.

При динамической зависимости компонентов программная архитектура формируется как граф процессов, которые используют подсистемы, модули и функции. Процессы могут выполняться неоднократно с использованием тех же самых подсистем, модулей и функций. Процесс может использовать несколько различных функций в течение своего выполнения.

Интерфейсы компонентов включают описание взаимодействия между различными компонентами, а также интерфейсы внутри компонентов ПО, помещенных в различные аппаратные составляющие в соответствии с аппаратными конфигурациями. Интерфейсы компонентов зависят от распределения программного обеспечения и от связей, наложенных аппаратной архитектурой.

Связь и управление включают связь (в смысле сообщений), имеющуюся между процессами при обработке запросов пользователя, а также при сопровождении и администрировании. Вследствие того, что различные компоненты программного обеспечения помещены в аппаратные компоненты, которые взаимосвязаны, аппаратная архитектура также воздействует и на связь, и на управление.

Загруженность системы зависит от количества и типа запросов пользователя, а также от процедур администрирования и сопровождения. Загруженность системы отражается количеством и типом процессов и сообщений и использованием компонентов ПО. Зависимости компонентов позволяют неисправности распространяться из компонента, в котором она происходит, к другим компонентам. Это распространение может вызывать сбои в цепочке (или в дереве) компонентов. Обнаружение отказов зависит от выполненных тестов или от количества и типа запросов пользователя. Ошибка может произойти в любом компоненте. Эта ошибка может быть вызвана сбоем, переданным другим компонентом, или это может быть сбой, произошедший именно в этом компоненте. Ошибка может быть прослежена через цепочку (или дерево) зависимости компонентов для устранения всех сбоев, которые связаны с этой ошибкой.

Надежность ПО зависит от уровня, соответствующего различным компонентам и их зависимостям. В зависимости от того, где произошел сбой, длительность отказа системы и его влияние на надежность системы различны. Сбой может происходить на различных уровнях архитектуры, в модуле, процессе, интерфейсе компонента или в связи и механизме контроля.

Число архитектурных уровней в модели архитектуры ПО зависит от частного (прикладного) проекта системы. Каждый архитектурный уровень содержит граф компонентов каждого типа (граф модулей и граф процессов). Процессы используют модули в период времени их исполнения. Процесс может использовать несколько различных модулей, а модуль может использоваться несколькими различными процессами. Граф процессов представляет динамическую зависимость компонентов, а граф модулей представляет статическую зависимость компонентов. Как показано в работе [25], эта архитектура может быть расширена до произвольного числа уровней с графами компонентов на различных уровнях. В модели архитектуры граф процессов находится на самом верхнем уровне, а графы остальных компонентов, например функции, примитивы, данные, структуры и сообщения, находятся на отдельных нижних уровнях.

В крупных современных системах обработки информации часто используются СУБД как компонент архитектуры. Быстродействие и надежность СУБД значительно влияют на надежность всей системы, поэтому оптимизации быстродействия СУБД должно уделяться больше внимания на всех стадиях разработки ПО [53].

Среднее время простоя системы в архитектуре ПО зависит от условных и безусловных вероятностей сбоев на всех уровнях архитектуры и от среднего времени доступа, анализа и восстановления сбойных компонентов. Время устранения сбоя равно времени, которое требуется для доступа, анализа, восстановления. Это означает, что время восстановления меньше, чем время устранения сбоя. Если используется автоматическое восстановление и компонент не содержит сбоев, то он рассматривается как восстановленный компонент. Ошибка того же типа, что была устранена, считается новой ошибкой.

Среднее время простоя системы вычисляется для всех архитектурных уровней и всех компонентов на каждом уровне. Для каждого архитектурного уровня в ПО вероятность использования каждого компонента зависит от вероятности сбоя компонента и средних времен анализа, доступа и восстановления для этого компонента.

Более того, сбойный компонент может вызывать сбои в зависящих от него компонентах как на других уровнях архитектуры, так и на том же самом уровне. Поэтому для каждого отдельного уровня архитектуры и для всех компонентов надо учитывать условную вероятность появления сбоя и относительные времена доступа, анализа и восстановления этих компонентов. Также для одного уровня и для всех компонентов условная вероятность появления сбоя зависит от относительных времен доступа, анализа и восстановления этих компонентов.

Среднее время появления сбоя зависит от условных и безусловных вероятностей сбоев во всех

компонентах на всех архитектурных уровнях и от относительного времени использования компонентов, в которых сбоя не происходит. Среднее время сбоя вычисляется для всех архитектурных уровней и всех компонентов на каждом архитектурном уровне.

В каждом отдельном архитектурном уровне и для всех компонентов условная вероятность работы без сбоев зависит от относительного времени использования этих компонентов.

Время появления сбоя (MTTF) и среднее время простоя системы (TR) характеризуют возможность архитектуры ПО обеспечивать потенциальную производительность и достигать эту производительность после отказа. Первый показатель связан с понятием отказа ПО, а второй – с понятием восстановления. Время появления сбоя позволяет пользователю оценить возможность решения той или иной задачи. Среднее время простоя информирует о том, когда отказавшая система будет восстановлена. Время появления сбоя и среднее время простоя системы характеризуют поведение архитектуры ПО на начальном этапе работы вычислительной системы. Эти показатели не информативны при оценке работы архитектуры в течение длительного времени функционирования.

Готовность системы к эксплуатации в данный момент времени определяется как вероятность того, что система нормально функционирует в данный момент времени.

Надежность программного обеспечения определяется как вероятность того, что программное обеспечение функционирует без сбоев, в определенной операционной среде, в течение определенного промежутка времени. Коэффициент надежности архитектуры ПО можно оценить по формуле [61]

$$R = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N_j} PU_{ij} R_{ij} \ , \qquad (1)$$

где M – число уровней архитектуры ПО; N_j – число компонент на уровне j, $j = 1, ..., M$; PU_{ij} – вероятность использования компонента; R_{ij} – надежность компонента.

Оценить данные параметры на фазе разработки архитектуры невозможно, численные показатели в модель берутся непосредственно на фазах кодирования и тестирования.

Фаза кодирования ПО. Количество ошибок в выполнимом коде напрямую зависит от ошибок, сделанных на стадии кодирования. Одним из самых часто используемых параметров оценки корректности ПО является плотность ошибок.

Начальную плотность ошибок можно оценить как [3]

$$D = C \cdot F_{ph} \cdot F_{pr} \cdot F_m \cdot F_s, \qquad (2)$$

где F_{ph} – коэффициент фазы тестирования; F_{pr} – коэффициент командного программирования; F_m – коэффициент опытности и «зрелости» процесса разработки ПО; F_s – коэффициент структурирования; C – константа, определяющая количество ошибок/KLOC (ошибок на тысячу строк исходного кода).

Коэффициенты F_{pr}, F_m, F_s и C зависят только от мастерства и опыта команды разработчиков.

При оценке коэффициента командного программирования (F_{pr}) плотность ошибок зависит от конкретных людей, их опыта написания программ и отладки. Можно принять следующие значения параметра: «Высокий», «Средний», «Низкий». Числовые показатели определяются и задаются экспертом.

Для коэффициента опытности и «зрелости» процесса разработки ПО (F_m) принимаются следующие значения параметра: «Уровень 1», «Уровень 2», «Уровень 3», «Уровень 4», «Уровень 5». Числовые показатели определяются и задаются экспертом.

Коэффициент структурирования (F_s) позволяет взять во внимание зависимость плотности ошибок от языка программирования (отношение количества кода на ассемблере и языка высокого уровня):

$$F_s = 1 + 0{,}4a, \qquad (3)$$

где a – отношение количества кода на Ассемблере и языка высокого уровня. Предполагается, что код на ассемблере может содержать на 40 % ошибок больше.

Фаза тестирования ПО. Фаза тестирования самая продолжительная и может занять до 60 % от всего проекта. Во время тестирования выявляется самое большое количество ошибок в ПО. Рассмотрим меры покрытия теста, используемые на данной фазе:

– покрытие выражений – доля всех условных выражений, выполненных во время теста;

– покрытие ветвлений – доля всех ветвлений, выполненных во время теста;

– покрытие предикатов – доля всех переменных, которые используются для проверки условий перед условным переходом.

В начальной плотности ошибок (2) коэффициент фазы тестирования (F_{ph}) принимает следующие значения [3]: «Тестирование модуля», «Подсистемы», «Системы», «Приемлемость». Числовые показатели определяются и задаются экспертом.

Параметры для оценки D по выражению (2) должны быть скорректированы с использованием данных, накопленных в результате деятельности разработчиков ПО. Коэффициент C обычно лежит в диапазоне от 6 до 20 ошибок/KLOC. Можно брать как средние значения, так и max и min значения для оценки диапазона плотности ошибок.

Для тестирования ПО берется набор выходов программы и наблюдается реакция системы. Если ответ отличен от ожидаемого, то ПО имеет хотя бы одну ошибку. Тестирование преследует две цели: увеличить надежность так быстро, как это возможно, и найти максимальное количество ошибок. С другой стороны, в течение испытаний цель состоит в том, чтобы оценить надежность, таким образом, уровень найденных ошибок должен соответствовать фактическому.

Методы тестирования программных средств можно разделить на два основных класса [14]:

1. «Черный ящик» (функциональное тестирование). Для тестирования рассматриваются только входы и выходы ПО. Внутренняя структура ПО во внимание не берется. Это наиболее общий способ тестирования.

2. «Белый ящик» (структурное тестирование). Для теста используются знания о структуре ПО.

На практике комбинация двух методов приводит к наилучшим результатам. Тестирование ПО как «черный ящик» требует функционального описания программы, хотя некоторая информация о структуре позволяет тестировщикам выбрать наилучшие параметры для входов системы. Выбор входов может происходить случайным образом или разбиваться на группы. Группы входов могут подвергаться более тщательному тестированию. Комбинирование двух способов выбора входных диапазонов тоже применяется для тестирования ПО.

Некоторые ошибки достаточно легко обнаружить. Это ошибки, имеющие высокий уровень *обнаружимости*. Ошибки, которые трудно обнаружить, называются ошибками с низким уровнем обнаружимости. Они появляются при очень редко встречающихся комбинациях значений входных диапазонов. В начале тестирования большое количество ошибок имеет высокий уровень обнаружимости. Они легко обнаруживаются и устраняются. На последующих стадиях остаются ошибки, имеющие низкий уровень обнаружимости.

Тщательность тестирования может быть измерена с помощью коэффициента полноты покрытия теста. Коэффициент покрытия ветвлений кода – более четкая мера, чем коэффициент покрытия выражений. Некоторые разработчики используют коэффициент покрытия ветвлений, равный 0,85, как минимальное значение коэффициента.

Чтобы оценить операционную (транзакционную) надежность ПО, тестирование должно быть выполнено в соответствии с операционными профилями. Операционный профиль – множество несвязанных и непересекающихся входных диапазонов и вероятностей их использования компонентами. Для разных ОС профили могут различаться. Получение операционного профиля требует разделения пространства входных диапазонов на подмножества (листья) и затем оценки вероятностей использования каждого подмножества (листа). Подмножество с достаточно высокой вероятностью использования может быть разделено на зоны меньшего размера.

Моделирование роста надежности программного обеспечения. Средства для обеспечения требуемого уровня надежности ПО могут достигать 60 % ресурсов проекта. Следовательно, тестирование должно быть тщательным образом спланировано для реализации проекта к заданной дате. Даже после длительного периода тестирования дополнительное тестирование может выявить новые ошибки. ПО как результат проекта обладает должным уровнем надежности, но содержит ошибки. Для планирования и принятия решений используются SGRM (Software Growth Reliability Model) – модели роста надежности ПО [14]. В модели SGRM предполагается, что надежность растет пропорционально времени тестирования, которое может быть измерено временем использования процессора. Рост надежности определяют в терминах интенсивности сбоев $\lambda(t)$ в зависимости от количества ожидаемых ошибок за время t $\mu(t)$, как [3]:

$$\lambda(t) = \frac{d}{dt}\mu(t) \tag{4}$$

Пусть количество ошибок за время t – $N(t)$. Предположим, что ошибки устраняются по мере обнаружения. За основу возьмем экспоненциальную модель. Предполагается, что количество найденных и исправленных ошибок пропорционально количеству существующих ошибок.

Можно показать, что β_1 определяется как

$$\beta_1 = \frac{k}{SQ\frac{1}{r}}, \tag{5}$$

где S – количество инструкций в коде; Q – количество объектных инструкций в каждой инструкции кода; r – уровень выполнения инструкции компьютером k – называется коэффициентом подверженности ошибкам и меняется от 1×10^{-7} до 10×10^{-7}; t измеряется в секундах выполнения процессорного времени:

$$N(t) = N(0)\exp(-\beta_1 t), \tag{6}$$

где $N(0)$ – начальное количество ошибок; общее количество ошибок за время t:

$$\mu(t) = N(0) - N(t) = N(0)(1 - \exp(-\beta_1 t)), \tag{7}$$

в общем случае получаем

$$\mu(t) = \beta_0(1 - \exp(-\beta_1 t)), \tag{8}$$

где β_0 – общее количество ошибок, которые могут быть обнаружены, равно $N(0)$. Это предполагает, что во время отладки не делаются новые ошибки.

Выражение для интенсивности сбоев использует равенство

$$\lambda(t) = \beta_0\beta_1\exp(-\beta_1 t). \tag{9}$$

Экспоненциальная модель легка для понимания и применения. Преимущество этой модели в том, что параметры β_0 и β_1 четко определены еще до начала тестирования.

Подход SGRM может применяться при двух различных ситуациях.

1. До начала теста. Часто надо иметь предварительный план тестирования. Для экспоненциальной или логарифмической модели можно оценить время для достижения требуемого значения интенсивности сбоев, MTTF или плотности ошибок.

Во многих случаях t должно измеряться в человеко-часах и должно быть умножено на

соответствующий коэффициент, который определяется с использованием опыта предыдущих проектов.

2. Во время теста. Используя SGRM, можно оценить дополнительное время тестирования, необходимое для достижения желаемого уровня надежности.

Основные шаги использования SGRM:

1. Сбор данных. Данные об интенсивности сбоев включают множество погрешностей и «шума». Данные часто нуждаются в сглаживании. Наиболее общая форма сглаживания – это использование группировки данных. Группировка включает разделение теста на интервалы, затем рассчитывается средняя величина интенсивности сбоев на каждом интервале.

2. Выбор модели и определение параметров. Лучший способ выбора модели – это положиться на прошлый опыт проектов, использующих такую методику. Экспоненциальная и логарифмическая модели для экстраполяции параметров используются чаще всего. Данные первых тестов содержат большое количество шума. На самых ранних стадиях тестирования параметры могут очень сильно отклоняться от реальных, и они не могут использоваться, пока не будут стабилизированы.

3. Выполнение анализа о количестве дополнительных тестов. Используя подходящую модель, мы можем оценить количество необходимых дополнительных тестов для достижения определенного уровня интенсивности сбоев. Из этого рассчитывается минимальное время, которое необходимо затратить на тестирование.

В модели SGRM предполагается, что во время тестирования используется единая методика поиска ошибок. Каждая новая стратегия изначально эффективна для поиска определенных классов ошибок, но дает «всплески» в интенсивности сбоев. Для этого надо использовать процедуру сглаживания. Большей проблемой является то, что ПО продолжает модифицироваться во время тестов. Если изменения были значительны, то приходится выбрасывать из выборки значения, полученные ранее.

Одним из важных параметров эффективности SGRM является коэффициент покрытия ошибок. Коэффициент покрытия ошибок C_d линейно зависит от $C_в$ – коэффициента покрытия ветвлений. Коэффициент покрытия ветвления показывает, насколько эффективно были «захвачены» все возможные пути ветвления программы:

$$C_d = -a + bC_в,\ C_в > 0. \qquad (10)$$

Значения параметров a и b зависят от размера ПО и начальной плотности ошибок. Преимущество использования коэффициентов покрытия в том, что они напрямую зависят от того, насколько тщательно программа исследуется. Для достижения высокой надежности ПО должна использоваться более строгая мера, такая как коэффициент покрытия предикатов. Предикаты – условные операторы, которые влияют на внутреннее поведение программы.

Операционные профили тестирования. Вполне очевидно, что абсолютно полный тест некоторых компонентов ПО практически невозможно выполнить [35]. Это легко представить на примере модуля, находящего корни квадратного уравнения. Входом в модуль является вектор коэффициентов уравнения, а выходом – вектор решений. Каждый входящий элемент может принимать значения от $-\infty$ до $+\infty$. Сразу сталкиваемся с тем ограничением, что компьютерные программы не умеют работать с бесконечными числами, т. е. при очень больших или очень малых значениях входных коэффициентов мы даже не можем вычислить решение. Другое ограничение на время тестирования – если, например, перебирать значения коэффициентов от –5000 до 5000 с шагом 0,0001, то получим, что необходимо выполнить 10^{30} запусков модуля, что может занять несколько лет при условии, что не будет обнаружено ошибок.

Некоторыми исследователями предлагается составлять так называемые *операционные профили*. Профили представляют собой таблицы, включающие информацию о диапазонах входных данных модуля и вероятности сбоя на данном диапазоне данных. Субъективные и методологические оценки процесса разработки ПО не должны отображаться в операционных таблицах данных. Конечно, класс и технологии разработчика должны учитываться при выборе компонента, но их роль должна подкрепляться точными техническими данными.

Есть два способа оценки качества ПО:

1. Компонент был признан корректным.
2. Компонент был действительно (случайным образом) протестирован.

Оба способа требуют формальную спецификацию того, что компонент должен делать. Утверждение о том, что компонент был признан корректным, это гарантия его выполнения согласно его спецификации. Заявление, говорящее, что надежность компонента выше $1 - 10^{-4}$ за одно выполнение с доверительной вероятностью 99 %, означает, что не более чем в одном из ста случаев ошибка может произойти в одном из 10 000 испытаний.

Отображения профиля. Рабочие операционные профили должны рассматриваться при занесении результатов измерений в таблицу. Так как разработчик компонента не может знать, как его продукт будет использован и, следовательно, с каким профилем он встретится, будучи частью системы, таблица данных должна рассматривать профиль как параметр. Это значит, что в ней определяется отображение профиля в параметры надежности.

Подобласти компонентов. Компонент имеет естественное разделение его входного пространства на функциональные подобласти, и практическое описание его профиля как вектора весов над этими подобластями. Такая форма профиля позволяет разработчику тестировать компонент, не зная заранее, с какими данными он может позднее встретиться.

Процесс разработки компонента и системы ПО. В общих чертах процесс создания и использования компонентов ПО можно представить так:

1. Разработчик компонента определяет множество входных подобластей для выполнения компонента.
2. Разработчик компонента измеряет свойства компонента для каждой подобласти.
3. Разработчик компонента размещает в таблице данных список подобластей компонента и надежность.
4. Системный проектировщик определяет структуру системы, использующей компоненты.
5. Используя таблицы предполагаемых компонентов и испытательных профилей для системы, системный проектировщик вычисляет надежность системы.
6. Если нельзя достигнуть требуемой надежности системы, необходимо найти лучшие компоненты или изменить структуру системы, а после этого повторить вычисления.

Такая идеализированная модель не применима на практике. В настоящее время не существует прикладной теории надежности программной системы, состоящей из компонентов. Успешное теоретическое обоснование должно использовать сравнительно простую модель, но в то же время пользоваться сложившейся теорией тестирования и теорией надежности.

Рабочие профили компонент программного обеспечения отображают информацию о качестве компонента в его таблице данных статистического характера, следовательно, она должна быть получена путем случайного тестирования. Профиль, предназначенный для компонента, зависит не только от входного профиля системы, но также от позиции компонента в системе и действий других компонентов. Операционный профиль можно записывать с помощью двух таблиц, содержащих отображения профиля (одна – для параметра надежности, другая – для изменения профиля). Эти таблицы определяются через разделение на части входной области. Системный проектировщик может использовать эти части для вычисления надежности системы до начала ее работы.

Размер компонентов может качественно повлиять на концепцию разработки ПО, основанного на компонентах. Размер компонента во внимание не берется, кроме неявного допущения о том, что разработчик компонента протестировал компонент для подготовки его операционного профиля. ПО, соответствующее по размерам операционной системе (или даже компилятора), практически не может быть протестировано в целом, так же как не могут быть определены подходящие подобласти. Из этого следует, что такие системы должны быть построены из компонентов меньшего размера, подходящего для прямых оценок. Прежде чем рассматривать операционную систему в качестве компонента, нужно проанализировать ее собственные компоненты.

Оценка и анализ надежности должны осуществляться на каждом шаге создания отказоустойчивого ПО. В связи с тем, что нет единого подхода, методики и параметров для оценки надежности ПО, в настоящее время существует множество моделей и алгоритмов, проверенных практически, но имеющих ряд недостатков. Основной недостаток всех моделей – «узкая специализация». Модели всегда привязаны к какой-либо одной фазе разработки ПО, а иногда имеют чисто теоретическую ценность из-за того, что в них должны быть использованы данные, полученные на других стадиях разработки ПО, а авторы таких моделей, как правило, отводят этому факту второстепенное значение.

Наиболее перспективным является подход, направленный на создание некоторой гибридной модели, включающей в себя все достоинства хорошо проверенных моделей и алгоритмов. Существующие модели и алгоритмы необходимо модифицировать таким образом, чтобы выходные данные одной модели стали входными для других; предусмотреть единство понимания параметров, пересчет единиц измерения, нормализацию данных и удовлетворение современным требованиям и тенденциям, например таким, как объектно-ориентированный анализ и программирование. Из данного обзора мы видим, что очень важно использовать как можно больше априорной информации перед началом каждой фазы создания ПО, так как это обеспечит наиболее приемлемые и точные результаты.

Библиографические ссылки

1. Липаев В. В. Обеспечение качества программных средств. Методы и стандарты. М. : СИНТЕГ, 2001. – 380 с.
2. Липаев В. В. Надежность программных средств. М. : СИНТЕГ, 1998.
3. Lyu M. R. Software Fault Tolerance. Published by John Wiley & Sons Ltd, 1996.
4. Ковалев И. В., Золотарёв В. В., Жуков В. Г., Жукова М. Н. Методика построения модели безопасности автоматизированных систем // Программные продукты и системы. 2012. № 2. С. 16.
5. Авиженис А. Н., Лапри Ж.-К. Гарантоспособные вычисления: от идей до реализации в проектах // ТИИЭР. 1986. Т. 74, № 5. С. 8–21.
6. Avizienis A. The N-Version approach to fault-tolerant software // IEEE Trans. on Software Engineering. 1985. Vol. SE11, № 12. P. 1491–1501.
7. Tai A., Meyer J., Avizienis A. Performability Enhancement of Fault-Tolerant Software // IEEE Trans. on Reliability. 1993. Vol. 42, No. 2. P. 227–237.
8. Липаев В. В. Тестирование компонентов и комплексов программ. М. : СИНТЕГ, 2010. 400 с.
9. Характеристики качества программного обеспечения / Б. Боэм [и др.] М. : Мир, 1981. 208 с.
10. Боэм Б. У. Инженерное проектирование программного обеспечения: пер. с англ. М. : Радио и связь, 1985. 512 с.

11. Boehm B. W., Haile A. C. Information Processing // Data Automation Implications of Air Force Command and Control Requirements in the 1980's (CCPI – 1985). Vol. I. Highlights, Report SAMSO/XRS-71-1. U. S. Air Force Systems Command (NTIS: AD 900031L). Los Angeles, CA, 1982.

12. Ashrafi N., Berman O. Optimization Models for Selection of Programs, Considering Cost & Reliability // IEEE Transaction on reliability. 1992. Vol. 41, No 2. P. 281–287.

13. Zahedi F., Ashrafi N. Software reliability allocation based on structure, utility, price, and cost // IEEE Trans. on Software Engineering. 1991. Vol. 17, No. 4. P. 345–356.

14. Lyu M., Chen J. H., Avizienis A. Software diversity metrics and measurements // In Proc. IEEE COMPSAC 1992. Chicago, 1992. C. 69–78.

15. Elmendorf W. Fault-tolerant programming // In Digest of 2-nd FTCS. Newton, MA, 1972. C. 79–83.

16. Липаев В. В. Экономика производства сложных программных продуктов. М. : СИНТЕГ, 2008. 432 с.

17. Липаев В. В., Серебровский Л. А. Технология проектирования комплексов программ АСУ. М. : Радио и связь, 1983. 264 с.

18. Липаев В. В. Тестирование программ. М. : Радио и связь, 1986. 234 с.

19. Ковалев И. В. Система мультиверсионного формирования программного обеспечения управления космическими аппаратами : дис. … д-ра техн. наук. Красноярск : КГТУ, 1997. 228 с.

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

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

22. Ковалев И. В., Царев Р. Ю., Капулин Д. В. Архитектурная надежность программного обеспечения информационно-управляющих систем / М-во сельского хоз-ва Российской Федерации; Красноярский гос. аграрный ун-т. Красноярск, 2011.

23. Ковалев И. В., Новой А. В., Штенцель А. В. Оценка надежности мультиверсионной программной архитектуры систем управления и обработки информации // Вестник СибГАУ. 2008. № 3. С. 50–52.

24. Ковалев И. В., Новой А. В. Расчет надежности отказоустойчивых архитектур программного обеспечения // Вестник СибГАУ. 2007. № 4. С. 14–17.

25. Ковалев И. В., Царев Р. Ю., Завьялова О. И. Анализ архитектурной надежности программного обеспечения информационно-управляющих систем // Приборы. 2010. № 11. С. 24–26.

26. Антамошкин А. Н., Ковалев И. В., Царев Р. Ю. Математическое и программное обеспечение отказоустойчивых систем управления и обработки информации / М-во сельского хоз-ва Российской Федерации; Красноярский гос. аграрный ун-т. Красноярск, 2011.

27. Choi, J. G., Kang H. G. Reliability Estimation of nuclear digital I&C systems using Software Functional Block Diagram and control flow. FastAbstract ISSRE Copyright, 2000.

28. Berman O., Cutler M. Choosing an Optimal Set of Libraries // IEEE Transaction on reliability. 1996, Vol. 45, No 2. P. 303–307.

29. Choi J. G., Kang H. G. Reliability Estimation of nuclear digital I&C systems using Software Functional Block Diagram and control flow. FastAbstract ISSRE Copyright, 2002.

30. Costa D., Mendez T. On the Extention of Exception to Support Software Faults Models. FastAbstract ISSRE Copyright, 2000.

31. David Ph., Guidal C. Development of a fault tolerant computer system for the Hermes Space Shuttle // IEEE Trans. 1993. P. 641–648.

32. Dunham J. R., Knight C. J. Production of reliable flight crucial software: Validation method research for fault-tolerant avionics and control systems sub-working-group meeting // NASA Conf. Pub. 2222. NASA, 1985.

33. Grams T. The Poverty of Reliabiliy Growth Models. FastAbstract ISSRE Copyright, 1999.

34. Goseva-Popova K., Trivedi K. S., Mathur A. P. How Different Architecture Based Software Reliability Models are Reealated. FastAbstract ISSRE Copyright, 2000.

35. Hamlet D., Mason D., Wiot D. Foundational Theory of Software Component Reliability. FastAbstract ISSRE Copyright, 2000.

36. Hecht H. Fault tolerant software // IEEE Trans. Reliability. Vol. R-28. 1979. P. 227–232.

37. Hui-Qun Z. A., Jing S., Yuan G. New Method for Estimating the Reliability of Software System Based on Components. FastAbstract ISSRE and Chillarege Corp. Copyright, 2001.

38. Hudak J., Suh B.-H., Sieweorek D., Segall Z. Evaluation & comparition of fault-tolerant software techniques // IEEE Trans. Reliability. 2009. Vol. 14. P. 1229–1237.

39. Karunanithi N., Whitley D., Malaiya Y. K. Prediction of Software Reliability Using Connectionist // IEEE transactions on reliability. Models July. 1992. Vol. 18, No. 7.

40. Kaszycki G. Using Process Metrics to Enhance Software Fault Prediction Models. FastAbstract ISSRE Copyright, 1999.

41. Keene S. Progressive Software Reliability Modeling. FastAbstract ISSRE Copyright, 1999.

42. Knight C. J., Levenson N. G. An experimental evaluation of the assumption of independence in Multiversion programming // IEEE Trans. Software Engineering. 1986. Vol. SE-12. P. 96–109.

43. Levendel Y. Reliability analysis of large software systems: Defect data modeling // IEEE Trans. Software Engineering. 1990. Vol. 16. P. 141–152.

44. Liestman A., Campbell R.-H. Fault-Tolerant Scheduling Problem // IEEE Trans. on Software Engineering. 1986. Vol. SE-12. P. 1089–1095.

45. Pai G. J., Dugan J. B. Enhancing Software Reliability Estimation Using Bayaesan Network and Fault Trees. FastAbstract ISSRE and Chillarege Corp. Copyright, 2001.

46. Shooman M. L. Software Reliability for Use During Proposal and Early Design Stages. FastAbstract ISSRE Copyright, 2009.

47. Wattanapongsakorn N. Reliability Optimization for Software Systems with Multiple Applications. FastAbstract ISSRE and Chillarege Corp. Copyright, 2001.

48. Xie M., Yang B. Regression Goodness-Of-fit Test for Software Reliability Model Validation. FastAbstract ISSRE Copyright, 2000.

49. Lyu M. R. Handbook of Software Reliability Engineering / Edited by Michael R. Lyu Published. IEEE Computer Society Press and McGraw-Hill Book Company, 1996. 819 p.

50. Rosenberg L., Hammer T., Shaw J. Software Metrics and Reliability // Best Paper : Software reliability engineering was presented at the 9-th International Symposium, Award, 1998.

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

52. Ковалев И. В., Царев Р. Ю., Русаков М. А., Слободин М. Ю. Модели поддержки многоэтапного анализа надежности программного обеспечения автоматизированных систем управления // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2005. № 2. С. 30–35.

53. Ковалев И. В., Ступина А. А., Гаврилов Е. С. Транзакционная надежность технологий обработки данных в информационно-управляющих системах // Вестник СибГАУ. 2005. № 3. С. 52–57.

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

55. Головкин Б. А. Расчет характеристик и планирование параллельных вычислительных процессов. М. : Радио и связь, 1983. 272 с.

56. Гудман С., Хидетниеми С. Введение в разработку и анализ алгоритмов : пер. с англ. М. : Мир, 1981. 366 с.

57. Мамиконов А. Г., Кульба В. В., Косяченко С. А. Типизация разработки модульных систем обработки данных. М. : Наука, 1989. 165 с.

58. Мамиконов А. Г., Кульба В. В. Синтез оптимальных модульных систем обработки данных. М. : Наука, 1986.

59. Михалевич В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М. : Наука, 1982. 286 с.

60. Ковалев И. В., Нургалеева Ю. А., Ежеманская С. Н., Ерыгин В. Ю. Многоатрибутивное управление трудозатратами на разработку *n*-вариантных программных систем // Фундаментальные исследования. 2011. № 8–1. С. 124–127.

61. Kovalev I. V., Younoussov R. V. Fault-tolerant software architecture creation model based on reliability evaluation // Advanced in Modeling & Analysis : Journal of AMSE Periodicals. 2002. Vol. 48, № 3–4. P. 31–43.

References

1. Lipaev V. V. *Obespechenie kachestva programmnyh sredstv* [Quality assurance software]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 380 p.

2. Lipaev V. V. *Nadezhnost' programmnyh sredstv*. [The reliability of software]. Moscow, Nauka Publ., 1998.

3. Lyu M. R. Software Fault Tolerance. Edited by Michael R. Lyu Published by John Wiley & Sons Ltd, 1996.

4. Kovalev I. V., Zolotarjov V. V., Zhukov V. G., Zhukova M. N. [A method of constructing models of security of automated systems]. *Programmnye produkty i sistemy*. 2012, no. 2, p. 16. (In Russ.)

5. Avizhenis A. N., Lapri. Zh.-K. [Dependable computing: from ideas to implementation projects]. *TIIER*, 1986., vol. 74, no. 5, p. 8–21. (In Russ.)

6. Avizienis A. The N-Version approach to fault-tolerant software. *IEEE Trans. on Software Engineering.* 1985, Vol. 11, no. 12, p. 1491–1501.

7. Tai A. Performability Enhancement of Fault-Tolerant Software. *IEEE Trans. on Reliability.* 1993, Vol. 42, no. 2, p. 227–237.

8. Lipaev V.V. *Testirovanie komponentov i kompleksov programm* [Testing of components and systems programs]. Moscow, SINTEG Publ., 2010, 400 p.

9. Bojem B. *Harakteristiki kachestva programmnogo obespechenija* [Characteristics of software quality]. Moscow, Mir Publ., 1981, 208 p.

10. Bojem B. U. *Inzhenernoe proektirovanie programmnogo obespechenija* [Engineering design software]. Moscow, Radio i svjaz Publ., 1985, 512 p.

11. Boehm B. W. Information Processing. Data Automation Implications of Air Force Command and Control Requirements in the 1980's (CCPI – 1985), Vol. I: Highlights, Report SAMSO/XRS-71-1, U.S. Air Force Systems Command (NTIS: AD 900031L), Los Angeles, CA, 1982.

12. Ashrafi N. Optimization Models for Selection of Programs. Considering Cost & Reliability. *IEEE Transaction on reliability.* 1992, Vol. 41, no 2, p. 281–287.

13. Zahedi F. Software reliability allocation based on structure, utility, price, and cost. *IEEE Trans. on Software Engineering*, April 1991,Vol. 17, no. 4, p. 345–356.

14. Lyu M. Software diversity metrics and measurements. IEEE COMPSAC 1992. 1992 Chicago, p. 69–78.

15. Elmendorf W. Fault-tolerant programming. In Digest of 2-nd FTCS. June 1972, p. 79–83.

16. Lipaev V. V. *Jekonomika proizvodstva slozhnyh programmnyh produktov* [The economy of the production

of complex software products]. Moscow, SINTEG Publ., 2008, 432 p.

17. Lipaev V. V. *Tehnologija proektirovanija kompleksov programm ASU* [Design technology software systems ACS]. Moscow, Radio i svjaz Publ., 1983, 264 p.

18. Lipaev V. V. *Testirovanie programm* [Testing programs] Moscow, Radio i svjaz Publ., 1986, 234 p.

19. Kovalev I. V. *Sistema mul'tiversionnogo formirovanija programmnogo obespechenija upravlenija kosmicheskimi apparatami. Dis. dok. tehn. nauk.* [System multiversioned views of the formation of the software control of spacecraft. Dr. techn. sci.diss]. Krasnojarsk, KGTU, 1997. 228 p.

20. Kovalev I. V. [Multiversioned views method for increasing software reliability information and telecommunication technologies in corporate structures]. *Telekommunikacii i informatizacija obrazovanija.* 2003, no. 2, p. 50–55. (In Russ.)

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

22. Kovalev I. V., Carev R. Ju., Kapulin D. V. *Arhitekturnaja nadezhnost' programmnogo obespechenija informacionno-upravljajushhih system* [Architectural software reliability information management systems]. Ministry of agriculture of the Russian Federation, Krasnoyarsk state agrarian University, Krasnoyarsk, 2011.

23. Kovalev I. V., Novoj A. V., Shtencel A. V. [Reliability estimation multiversioned views of software architecture, control systems and information processing.]. *Vestnik SibGAU.* 2008, no. 3 (20), p. 50–52. (In Russ.)

24. Kovalev I. V., Novoj A. V. [Calculation of reliability of fault-tolerant software architectures.]. *Vestnik SibGAU.* 2007, no. 4 (17), p. 14–17. (In Russ.)

25. Kovalev I. V., Carev R. Ju., Zav'jalova O. I. [Analysis of architectural software reliability information management systems]. *Pribory.* 2010, no. 11, p. 24–26. (In Russ.)

26. Antamoshkin A. N., Kovalev I. V., Carev R. Ju. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie otkazoustojchivyh sistem upravlenija i obrabotki informacii* [Mathematical and software fault-tolerant control systems and information processing]. Ministry of agriculture of the Russian Federation, Krasnoyarsk state agrarian University, Krasnoyarsk, 2011.

27. Choi J. G. Reliability Estimation of nuclear digital I&C systems using Software Functional Block Diagram and control flow. FastAbstract ISSRE Copyright. 2000.

28. Berman O. Choosing an Optimal Set of Libraries. *IEEE Transaction on reliability.* June 1996, vol. 45, no 2, p. 303–307.

29. Choi J. G. Reliability Estimation of nuclear digital I&C systems using Software Functional Block Diagram and control flow. FastAbstract ISSRE Copyright. 2002.

30. Costa D. On the Extention of Exception to Support Software Faults Models. FastAbstract ISSRE Copyright. 2000.

31. David Ph. Development of a fault tolerant computer system for the Hermes Space Shuttle. IEEE Trans., 1993, p. 641–648.

32. Dunham J. R. Eds. Production of reliable flight crucial software: Validation method research for fault-tolerant avionics and control systems sub-working-group. NASA Conf. Pub. 2222, NASA, 1985.

33. Grams T. The Poverty of Reliabiliy Growth Models. FastAbstract ISSRE Copyright 1999.

34. Goseva-Popova K. How Different Architecture Based Software Reliability Models are Reealated. FastAbstract ISSRE Copyright. 2000.

35. Hamlet D. Foundational Theory of Software Component. FastAbstract ISSRE Copyright 2000.

36. Hecht H. Fault tolerant software. *IEEE Trans. Reliability.* 1979, vol. 28, p. 227–232.

37. Hui-Qun Z. A. New Method for Estimating the Reliability of Software System Based on Components. FastAbstract ISSRE and Chillarege Corp. Copyright. 2001.

38. Hudak J. Evaluation & comparition of fault-tolerant software techniques. *IEEE Trans. Reliability*. 2009, vol. 14, p. 1229–1237.

39. Karunanithi N. Prediction of Software Reliability Using Connectionist. *IEEE transactions on reliability Models.* July 1992, vol. 18, no. 7.

40. Kaszycki G. Using Process Metrics to Enhance Software Fault Prediction Models. FastAbstract ISSRE Copyright. 1999.

41. Keene S. Progressive Software Reliability Modeling. FastAbstract ISSRE Copyright, 1999.

42. Knight C. J. An experimental evaluation of the assumption of independence in Multiversion programming. *IEEE Trans. Software Engineering,* 1986, vol. 12, p. 96–109.

43. Levendel Y. Reliability analysis of large software systems: Defect data modeling. *IEEE Trans. Software Engineering,* 1990, vol. 16, p. 141–152.

44. Liestman A. Fault-Tolerant Scheduling Problem. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 1986, vol. 12, p. 1089–1095.

45. Pai G. J. Enhancing Software Reliability Estimation Using Bayaesan Network and Fault. ISSRE and Chillarege Corp. Copyright, 2001.

46. Shooman M. L. Software Reliability for Use During Proposal and Early Design Stages. FastAbstract ISSRE Copyright, 2009.

47. Wattanapongsakorn N. Reliability Optimization for Software Systems with Multiple Applications. FastAbstract ISSRE and Chillarege Corp. Copyright, 2001.

48. Xie M. Regression Goodness-Of-fit Test for Software Reliability Model Validation. FastAbstract ISSRE Copyright, 2000.

49. Lyu M.R. Handbook of Software Reliability Engineering . IEEE Computer Society Press and McGraw-Hill Book Company, 1996, 819 p.

50. Rosenberg L. Software Metrics and Reliability. Software reliability engineering was presented at the 9-th International Symposium, “Best Paper” Award, November, 1998.

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

52. Kovalev I. V., Carev R. Ju., Rusakov M. A., Slobodin M. Ju. [Models support multi-stage analysis of software reliability of automated control systems]. *Problemy mashinostroenija i avtomatizacii*. 2005, no. 2, p. 30–35. (In Russ.)

53. Kovalev I. V., Stupina A. A., Gavrilov E. S. [Transactional reliability of data processing technology in information and control systems]. *Vestnik SibGAU*. 2005, no. 3, p. 52–57. (In Russ.)

54. Engel E. A., Kovalev I. V. [Information processing using intelligent algorithms by solving wcci 2010 tasks]. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 3 (36), p. 4–8. (In Russ.)

55. Golovkin B. A. *Raschet harakteristik i planirovanie parallel'nyh vychislitel'nyh processov* [Calculation of characteristics and planning of parallel computing processes]. Moscow, Radio I Svyaz Publ., 1983, 272 p.

56. Gudman S. *Vvedenie v razrabotku i analiz algoritmov* [Introduction to the design and analysis of algorithms]. Moscow, Mir Publ., 1981, 366 p.

57. Mamikonov A. G. *Tipizacija razrabotki modul'nyh sistem obrabotki dannyh* [Typing the development of modular data processing systems]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 165 p.

58. Mamikonov A. G. *Sintez optimal'nyh modul'nyh sistem obrabotki dannyh* [Synthesis of optimal modular data processing systems]. Moscow, Nauka Publ., 1986.

59. Mihalevich V. S. *Vychislitel'nye metody issledovanija i proektirovanija slozhnyh sistem* [Computational methods for the study and design of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 286 p.

60. Kovalev I. V., Nurgaleeva Ju. A., Ezhemanskaja S. N., Erygin V. Ju. [Diversified management work on the development of n-variant software systems]. *Fundamental'nye issledovanija.* 2011, no. 8–1, p. 124–127. (In Russ.)

61. Kovalev I. V. Fault-tolerant software architecture creation model based on reliability evaluation. *Journal of AMSE.* 2002, vol. 48, no. 3, p. 31–43.

© Ковалев И. В., 2014

УДК 62-506.1

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 93–99

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КЛАССА ГАММЕРШТЕЙНА

Н. В. Коплярова, Н. А. Сергеева

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

Предлагается и исследуется алгоритм моделирования нелинейных динамических систем, представимых в виде последовательного соединения нелинейного безынерционного и линейного динамического блоков (модель Гаммерштейна). Рассматриваются системы, находящиеся в условиях частичной параметризации. В данном случае считается, что структура и параметры линейной динамической части неизвестны, а вид нелинейности известен с точностью до набора параметров. Алгоритм идентификации (моделирования на основе наблюдений входных-выходных переменных системы) основан на объединении в модели непараметрической оценки линейного элемента и оценивания параметров нелинейного элемента. Разработаны алгоритмы моделирования в случае, когда вид нелинейности представляет собой квадратор и звено насыщения. Проведены численные расчеты, показывающие, что разработанные алгоритмы успешно справляются с задачей идентификации нелинейных систем типа Гаммерштейна.

Ключевые слова: модель Гаммерштейна, непараметрическая оценка, нелинейная динамика, априорная информация.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 93–99

NONPARAMETRIC MODELS OF THE HAMMERSTEIN DYNAMICAL OBJECTS

N. V. Koplyarova, N. A. Sergeeva

Siberian Federal University
79, Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: koplyarovanv@mail. ru

The problem of nonlinear dynamical systems of the Hammerstein type identification is considered. Systems in the conditions of partial parameterization are considered. In this case structure and parameters of equation, which describe the linear dynamical part of the object, are unknown. The common type of nonlinearity is assumed to be known with the set of parameters. It is required to construct the mathematical model of the investigation system, which is based on the input-output measures sample. The proposed method of dynamic objects modeling is based on the nonparametric estimation of linear and nonlinear parts of the system. At first it is offered to estimate the nonlinear element parameters, and to the input of system consistently applied different input actions. Then the linear dynamical part model can be constructed as a Duhamel integral, where the impulse response function is estimated with nonparametric algorithm. Presented algorithm doesn't require a complete priory information about the object structure. In the work the results of computer modeling of the Hammerstein type systems with the quard and the saturation nonlinearity are shown. This nonparametric model can describe the investigation systems with different types of nonlinearity, in conditions of noise in the measure channels, and with different sample sizes and input actions. The numerical researches show that the algorithms should be used to identify the Hammerstein type nonlinear systems.

Keywords: Hammerstein model, nonparametric estimation, nonlinear dynamics, a priori information.

Введение. Проблема идентификации нелинейных динамических систем относится к разряду важнейших задач теории автоматического управления. В связи с большим разнообразием систем рассматриваемого типа не существует универсальной методики их идентификации. При этом в основном задача рассматривается в узком смысле, когда структура исследуемого объекта известна с точностью до вектора параметров [1]. Настоящая статья посвящена идентификации динамических систем в широком смысле, когда информация об объекте находится на уровне непараметрической неопределенности. В данном случае на основании

имеющейся априорной информации удается лишь частично параметризовать модель исследуемого процесса. Большое число нелинейных систем можно представить в виде блока с последовательным включением нелинейного элемента и линейной части. В данной работе исследуются динамические процессы типа Гаммерштейна.

Пусть имеется нелинейный объект, который может быть описан как последовательное сочетание линейного динамического и нелинейного статического блоков [2]. Преимуществом использования таких моделей является их относительная простота, поскольку в них нелинейные и динамические свойства исследуемого объекта разделены на отдельные части. Линейный динамический блок моделей в этом случае должен воспроизводить динамические свойства исследуемого объекта, нелинейный блок – описывать его нелинейные свойства [3]. Основная сложность в построении моделей таких объектов заключается в том, что промежуточные сигналы (значения выхода блока, находящегося первым в последовательности) являются недоступными для измерения. Требуется по наблюдаемым входным-выходным переменным процесса построить математическую модель стохастического объекта, с помощью которой можно получать прогноз его поведения в различных условиях (при произвольном входном воздействии и наличии помех), который будет достаточно удовлетворительным с практической точки зрения.

Постановка задачи идентификации. В общем виде задача идентификации нелинейной динамической системы может быть описана схемой, представленной на рис. 1, 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 $M\{\varepsilon\} = 0,\quad D\{\varepsilon\} < \infty$; $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта; $w(t)$ – выходная переменная нелинейного элемента системы (неизмеряемая).

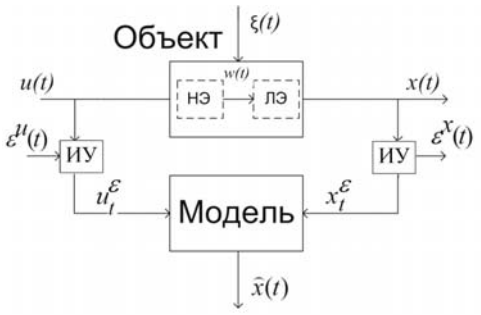


Рис. 1. Общая схема задачи идентификации

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. Задача идентификации нелинейной системы в описанной постановке может быть разделена 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. Сначала рассмотрим задачу идентификации линейного элемента.

Идентификация линейной динамической системы. Непараметрическая модель линейного динамического объекта строится на основании переходных характеристик. На вход объекта подается функция Хевисайда $u(t) = 1(t)$, а на выходе наблюдаем его переходную функцию $x(t) = h(t)$. По наблюдениям $\{u_i, x_i,\ t = 1,s\}$ требуется построить модель линейной динамической системы (ЛДС), порядок которой неизвестен. Непараметрическая модель системы конструируется на основе оценки интеграла Дюамеля. В этом случае зависимость реакции динамической системы $w(t)$ на входное воздействие $u(t)$ при нулевых начальных условиях описывается интегралом свертки [3]:

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

где $h(t)$ – переходная характеристика системы; $k(t)$ – весовая (импульсная переходная) функция этой же системы; τ – переменная интегрирования.

Вычисление значения выхода объекта при этом возможно, если известна его весовая функция $k(t)$. Однако в реальных системах «снятие» весовой функции объекта представляется невозможным, в связи с чем требуется специальный прием, изложенный ниже. Основная идея идентификации ЛДС в условиях непараметрической неопределенности [3] состоит в непараметрическом оценивании весовой функции системы. Подав на вход системы воздействие в виде функции Хевисайда, получим значения ее переходной функции в дискретные моменты времени t_i, $i = 1,s$. Тогда оценку переходной функции системы можно записать в виде стохастической аппроксимации регрессии непараметрического типа следующим образом [4]:

$$h_s(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} h_i H\left(\frac{t - t_i}{c_s}\right), \qquad (2)$$

где $\{ h_i = x_i / u(t) = 1, i = 1,s\}$ – экспериментально полученные значения переходной характеристики ЛДС, т. е. сигнал, получаемый на выходе системы при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия $u(t) = 1(t)$ при нулевых начальных условиях. При этом в выражении (2) колоколообразная функция и параметр размытости должны удовлетворять следующим условиям сходимости:

$$c_s > 0; \lim_{s\to\infty} c_s = 0; \lim_{s\to\infty} sc_s = \infty\,, \qquad (3)$$

$$\int_{\Omega(u)} H'(u)\,du = 0,\ c_s \int_{\Omega(u)} H'(u)\,u\,du = -1,\ u = \frac{\tau - t}{c_s}, \qquad (4)$$

$$\lim_{s\to\infty} c_s^{-1} H\left(\frac{\tau - t}{c_s}\right) = \delta(\tau - t)\,.$$

Известно, что весовая функция $k(t)$ определяется соотношением $k(t) = dh(t)/dt$. Тогда непараметрическая оценка весовой функции примет следующий вид:

$$k_s(t) = h_s'(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} h_i H'\left(\frac{t - t_i}{c_s}\right). \qquad (5)$$

Подставив оценку весовой функции в интеграл Дюамеля, получим непараметрическую модель ЛДС. После чего, заменив интеграл его дискретным аналогом, получим непараметрическую расчетную модель линейного динамического элемента системы [3]:

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

где τ – переменная интегрирования; $\Delta\tau$ – шаг дискретизации. Далее рассмотрим алгоритм идентификации нелинейной системы.

Идентификация системы типа Гаммерштейна. Рассмотрим систему, поведение которой может быть описано с помощью модели Гаммерштейна (рис. 2).

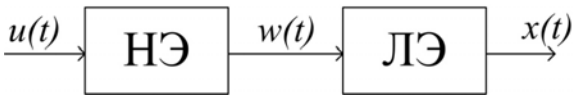


Рис. 2. Модель Гаммерштейна: ЛЭ – линейная динамическая часть; НЭ – нелинейный элемент системы; $u(t)$ – входное воздействие; $w(t)$ – выход промежуточного звена объекта; $x(t)$ – выход объекта

Выход нелинейного элемента $w(t)$ измерению недоступен. Предполагается, что параметризованная структура ЛЭ неизвестна, а вид нелинейной характеристики НЭ известен с точностью до набора параметров.

Согласно рис. 2 связь между входом $u(t)$ и выходом $x(t)$ объекта при нулевых начальных условиях может быть описана системой уравнений следующего вида [3]:

$$w(t) = f(u(t), \alpha), \qquad (7)$$

$$x(t) = \int_0^t k(t - \tau) w(\tau) d\tau,$$

или при замене переменной $w(t)$ в соответствии с (7) получим:

$$x(t) = \int_0^t k(t - \tau) f(u(\tau), \alpha) d\tau\,, \qquad (8)$$

где $k(t)$ – весовая функция динамического элемента; $f(u, \alpha)$ – нелинейная функция, заданная с точностью до вектора неизвестных параметров α.

Положим, что x^1 – реакция нелинейного объекта на входной сигнал в виде функции Хевисайда $u(t) = 1(t)$, а $x(t)$ – реакция объекта на некоторый входной сигнал произвольной формы.

Ступенчатый сигнал $u(t) = 1(t)$ после прохождения нелинейного элемента сохраняет ступенчатую форму, но меняет амплитуду, т. е. $\omega(t) = f(1(t), \alpha) = \text{const}$. То есть значение выхода НЭ $w(t)$ при подаче на вход ступенчатого воздействия является постоянной величиной и может рассматриваться как входное воздействие для ЛЭ. Тогда выход нелинейной системы, оцениваемый как $x^1(t) = \int_0^t h1'(t - \tau) 1(\tau) d\tau$, можно рассматривать как переходную функцию некоторой линейной динамической системы, где приняты следующие обозначения: $x^1(t)$ – выход нелинейной системы при подаче на ее вход единичного воздействия; $h1(t)$ – переходная функция линейного элемента системы. Оценка переходной функции может быть получена на основе выборки $\{x^1{}_i, t_i\}, i = \overline{1,s}$.

С учетом оценки $\hat{h}1(t)$, модель нелинейной системы (8) можно записать в следующем виде [5]:

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

Оценки параметров нелинейного элемента $\{x^1{}_i, t_i\}, i = \overline{1,s}$ находятся на основе выборки измерений $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1,s}$ в общем случае как решения экстремальной задачи. В частности, алгоритм оценивания параметров НЭ определяется в зависимости от вида нелинейности, некоторые из возможных алгоритмов подробно рассмотрены далее. Тогда непараметрическая модель системы Гаммерштейна будет описываться следующим образом:

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

где $\hat{h}1_i$ – оценка переходной характеристики линейного элемента; $\hat{f}(t)$ – оценка нелинейного элемента системы. Далее рассмотрим алгоритм моделирования при НЭ в виде квадратора.

Непараметрическая модель системы с квадратором. Пусть имеется система, представленная в виде модели Гаммерштейна (рис. 2). 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 тогда рассчитывается следующим образом:

$$x^1(t)=\int_0^t h'(t-\tau)w(\tau)d\tau=$$
$$=a\int_0^t h'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau=a\int_0^t h'(t-\tau)d\tau. \quad (11)$$

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. $x^1(t)=ah(t)$. Тогда переходная функция ЛЭ оценивается следующим образом:

$$\hat{h}(t)=x^1(t)/a. \quad (12)$$

При произвольном входном воздействии и нулевых начальных условиях выход линейной части системы описывается выражением (9). С учетом рассчитанного значения переходной функции (12) модель нелинейного динамического объекта примет вид

$$\hat{x}(t)=a\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau=\int_0^t \hat{x}^1(t-\tau)u^2(\tau)d\tau. \quad (13)$$

Далее приведем расчетную непараметрическую модель нелинейного объекта, представленного в виде модели Гаммерштейна с квадратором:

$$\hat{x}(t)=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau}x_i^1 H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u^2(\tau_j)\Delta\tau, \quad (14)$$

где $\hat{x}(t)$ – непараметрическая модель исследуемой системы; x_i^1 – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие; $u(t)$ – тестовое входное воздействие.

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему Гаммерштейна, состоящую из квадратора с параметром a = 3 и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект): $3\cdot x''(t)+0,52\cdot x'(t)+1\cdot x(t)=u(t)$. Результаты моделирования данного объекта при различных входных воздействиях представлены на рис. 3 и 4.

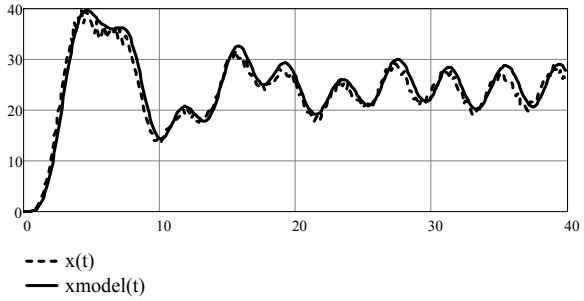


Рис. 3. Результат оценки выхода $x(t)$: $x$model(t) – модель нелинейной системы, x – выход системы, объем выборки s = 300, h = 0,117, помеха 5 %, входное воздействие $u(t)$ = 4sin(0,8t), относительная ошибка моделирования 3,2 %

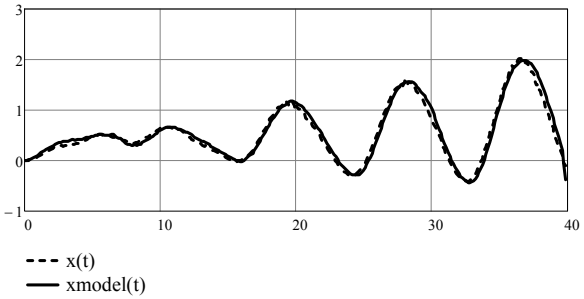


Рис. 4. Результат оценки выхода $x(t)$: $x$model(t) – модель нелинейной системы, x – выход системы, объем выборки s = 300, h = 0,117, помеха 5 %, входное воздействие $u(t)$ = 0,5cos(0,75t) + 0,01t, относительная ошибка моделирования 2,88 %

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

Непараметрическая модель системы с насыщением. Рассмотрим нелинейную динамическую систему, нелинейность в которой представлена звеном насыщения, т. е. описывается функцией вида

$$f(u)=\begin{cases} u, |u|\le b, \\ a\cdot\mathrm{sign}(u), |u|>b, \end{cases} \quad (15)$$

где a, b – некоторые неизвестные параметры.

Модель системы в общем виде может быть описана уравнением вида (4), где неизвестными являются значения параметров функции $f(u)$ и переходная характеристика линейного элемента системы. Учитывая вид нелинейности, в данном случае при $w(t)<b$, выход объекта совпадает с выходом его линейной динамической части. В остальных случаях выход объекта представляет собой константу, которую возможно определить опытным путем в результате нескольких

экспериментов над системой, которые будут описаны далее [6].

Подадим на вход объекта единичное воздействие в виде функции Хевисайда, тогда выход нелинейного элемента вычисляется как

$$w(t)=\begin{cases}1, |b|\le 1,\\ a\cdot \mathrm{sign}(b), |b|>1.\end{cases} \qquad (16)$$

Далее рассмотрим каждый из данных возможных случаев подробнее.

1. Если $|b|>1$, тогда выход нелинейной системы (обозначим его $x^1(t)$) фактически будет равен величине $x^1(t)=a\cdot \mathrm{sign}(b)\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)d\tau$. При этом в теории моделирования линейных динамических систем с применением непараметрического подхода, если подать на вход модели воздействие $u(t)$ = 1, 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 $x^1(t)=a\cdot \mathrm{sign}(b)\cdot \hat{h}(t)$, получим оценку переходной функции следующим образом: $\hat{h}(t)=x^1(t)\ /\ a\cdot \mathrm{sign}(b)$.

2. Если $|b|\le 1$, выход нелинейной системы ($x^1(t)$) будет равен значению переходной функции системы:

$$x\ (t)=\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)d\tau=\hat{h}(t).$$

Таким образом, оценка переходной функции нелинейного объекта может быть рассчитана как

$$\hat{h}(t)=\begin{cases}x^1(t)/a\cdot \mathrm{sign}(b) & , |b|>1,\\ x^1(t) & , |b|\le 1,\end{cases} \qquad (17)$$

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:

1. Проводится серия экспериментов, в ходе которых на вход системы последовательно подаются воздействия различной амплитуды $u_{i,j}=e_j$, $e_j=\mathrm{const}$. При этом, если $u_{i,j}=e_j$, то выход нелинейного объекта равен $w(t)=e_j$, если $e_j<b$ или в противном случае, то $w(t)$ = a·sign(b). 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.

Таким образом, в результате получим выборку, составленную из значений входных воздействий и установившегося значения выхода нелинейной системы: $\{u_{i,j}, x_{i,j}=x_y\}, i=\overline{1,s}, j=\overline{1,m}$. На основании этой выборки параметры нелинейного элемента могут быть оценены согласно следующему алгоритму.

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	$x(t)=e_4\hat{h}(t)$	$e_4\cdot h_y$
…	…	…	…
$e_k>b, k<n$	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	$x(t)=a\hat{h}(t)$	$a\cdot h_y$

2. Находится расстояние между двумя соседними измерениями: $d_j=|x_{i,j}-x_{i-1,j}|/dt$, где dt – шаг дискретизации выборки.

3. $\hat{b}=x_{i,j}$, если $d_j<\varepsilon, \varepsilon>0$.

4. Если $x_{i,j}=\hat{b}$, то $x_j=y_{i-1,j}$, $\hat{a}\ =M\{a_j\}$.

В соответствии с видом функции оценка нелинейного элемента примет вид

$$\hat{f}(u)=\begin{cases}u, |u|\le \hat{b},\\ \hat{a}\cdot \mathrm{sign}(u), |u|>\hat{b}.\end{cases}$$

Далее на вход объекта подается некоторая ступенчатая функция, значение которой не превышает порога b, т. е. 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, выглядит как

$$\hat{x}(t)=\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)\hat{f}(u(\tau),\hat{a},\hat{b})d\tau. \qquad (18)$$

Численный вариант данной модели:

$$\hat{x}(t)=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau}\hat{h}_i H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)\hat{f}(u(\tau_j))\Delta\tau. \qquad (19)$$

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему в виде модели Гаммерштейна, состоящую из звена насыщения (параметры a = 2, b = 0,3) и разност-

ного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект): $x''(t)+0,32\cdot x'(t)+2\cdot x(t)=u(t)$. На рис. 5, 6 представлена непараметрическая модель нелинейной системы.

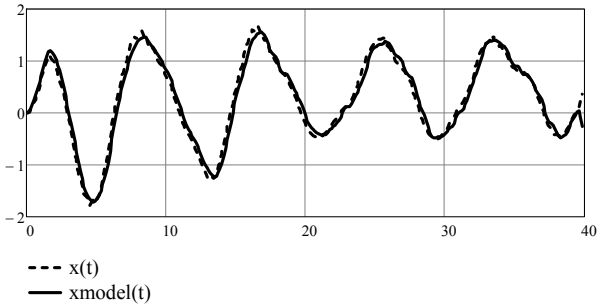


Рис. 5. Результат оценки выхода $x(t)$: $x$model(t) – модель нелинейной системы, $x(t)$ – выход системы, объем выборки s = 300, шаг дискретизации h = 0,15, помеха 5 %, входное воздействие $u(t)$ = = 0,5cos(0,75t) + 0,01t, ошибка моделирования 2,45 %

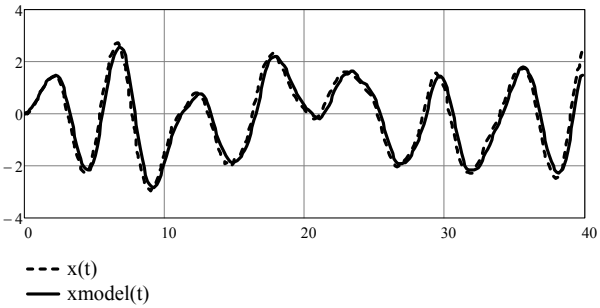


Рис. 6. Результат оценки выхода $x(t)$: $x$model(t) – модель нелинейной системы, $x(t)$ – выход системы, объем выборки s = 200, шаг дискретизации h = 0,15, помеха 5 %, входное воздействие $u(t)$ = = 5cos(0,7t)cos(0,4t – 0,2), ошибка моделирования 3,5 %

Заключение. Делая анализ работы модели нелинейного динамического объекта с видом нелинейности типа звена насыщения и квадратора, можно сделать выводы о том, что непараметрическая модель достаточно точно описывает систему при различных значениях параметров нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и различных входных воздействиях.

Приведены результаты вычислительных экспериментов, состоящие в построении непараметрических моделей динамических процессов типа Гаммерштейна, в случае, когда вид нелинейного элемента представлял собой квадратор и звено насыщения. Полученная непараметрическая модель достаточно качественно описывает исследуемые системы при различных видах нелинейной части объектов, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и входных воздействиях.

Работа посвящена рассмотрению задачи непараметрической идентификации нелинейных динамических систем, представленных в виде модели Гаммерштейна. Исследуется случай, когда задача идентификации ставится в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. При этом структура линейного динамического блока неизвестна, а вид нелинейности предполагается известным с точностью до параметров. Задача идентификации нелинейной системы рассмотренного типа разделена на две части. Сначала рассматривается непараметрическая идентификация линейного элемента, алгоритм которой связан с тем, что реакция линейной системы на входное воздействие описывается интегралом Дюамеля. Приводятся методика построения моделей для получении прогноза выхода нелинейных систем посредством сочетания моделей линейного динамического и нелинейного статического процессов в общей модели системы. Были проведены многочисленные вычислительные эксперименты при различном интервале дискретизации и различном уровне помех при измерении входных-выходных переменных. В статье приведен лишь один из них. Полученная непараметрическая модель достаточно качественно описывает исследуемые системы при различных видах нелинейной части объектов, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и входных воздействиях. Следует отметить одно обстоятельство – полученные модели нелинейной динамики могут оказаться полезными, если учесть, что исполнительный механизм и объект можно рассматривать как модель Гаммерштейна.

Библиографические ссылки

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

2. Медведев А. В. Непараметрические алгоритмы идентификации нелинейных динамических систем // Стохастические системы управления. Новосибирск : Наука, 1979. С. 15–22.

3. Чайка С. Н. К идентификации динамических систем класса Гаммерштейна при частично параметризованной структуре модели // Динамика систем: Управление и оптимизация. Горький : Изд-во Горьковского гос. ун-та, 1989. С. 24–36.

4. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбилисского ун-та, 1983. 194 с.

5. Попков Ю. С. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем. М. : Энергия, 1976. 440 с.

6. Коплярова Н. В., Сергеева Н. А. О непараметрических алгоритмах идентификации нелинейных динамических систем // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5(51). С. 39–44.

References

1. Cypkin Ja. Z. *Osnovy informacionnoi teorii identificacii* [Fundamentals of the informational theory of identification]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p.

2. Medvedev A. V. [Nonparametric algorithms of nonlinear dynamical system identification]. *Stohastiches-*

kie sistemi upravleniya [Stochastic control system]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, p. 15–22.

3. Chaika S. N. [To dynamical systems of Hammerstein class identification with partially parameterized model structure]. *Dinamica system: upravlenie i optimizaciya* [System dynamics: Control and optimization]. Gorki, Gorki university Publ, 1989, p 24–36.

4. Nadaraya E. A. *Neparametricheskoe ocenivanie plotnosti veroyatnosti I krivoi regressii* [Nonparametric estimation of probability density function and regression curve]. Tbilissi, Tbilissi Univ. Publ, 1983, 194 p.

5. Popkov U. S. *Identifikaciya I optimizaciya nelineinih stohasticheskih sistem* [Identification and optimization of nonlinear stochastic systems]. Moscow, Energya Publ., 1976, 440 p.

6. 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., Сергеева Н. А., 2014

УДК 621.314.2

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 100–106

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОВЫШАЮЩЕ-ПОНИЖАЮЩЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕВЕРСА ПОТОКА ЭНЕРГИИ И ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Ю. В. Краснобаев, В. В. Захаров, М. А. Карнаухов

Институт космических и информационных технологий
Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26б
E-mail: uvkras@mail.ru; vavuh13@gmail.com; MKarnaukhov.KI11@gmail.com

Рассмотрены вопросы передачи энергии в зарядно-разрядном устройстве, выполненном по схеме реверсивного понижающе-повышающего преобразователя с режимом коммутации силовых транзисторов при нуле напряжения. Разработаны методика и алгоритм вычисления зависимости действующего тока через элементы силовой цепи преобразователя от параметров элементов силовых цепей и параметров процесса преобразования энергии.

Ключевые слова: зарядно-разрядное устройство, реверсивный понижающе-повышающий преобразователь, коммутация силовых транзисторов при нуле напряжения.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 100–106

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN AC-DC CONVERTERS WITH POSSIBILITY OF REVERSE FLOW OF ENERGY AND INCREASED EFFICIENCY

Y. V. Krasnobaev, V. V. Zakharov, M. A. Karnaukhov

Institute of space and information technologies, Siberian Federal University
26b, Akademika Kirenskogo St., Krasnoyarsk, 660074, Russia Federation
E-mail: uvkras@mail.ru; vavuh13@gmail.com; MKarnaukhov.KI11@gmail.com

The paper considers the questions of energy transfer in a charge/discharge autonomous power supply device. Power circuit of considered charge/discharge device is based on the scheme of reversing up/down converter with the switching mode of power transistors at zero-voltage that ensures high efficiency of device. In the course of analysis of electromagnetic processes in the converter, mathematical expressions that describe the transfer of energy, from the side one to the side two of the reversible converter have been obtained. Using the obtained mathematical expressions, a method and algorithm for calculating RMS current through elements of the power converter circuit using parameters of the power circuit elements and parameters of energy transformation, in particular, using reverse displacement current of a choke, providing switching mode of power transistors at zero voltage have been developed. Correlation between RMS current through a choke and power transistors, and value of reverse replacement current of a choke for a number of modes are given graphically. All correlations were obtained at fixed power at the side two and variation of voltage value at the side one of converter. Analysis of obtained correlations has shown growth of RMS current through power circuit elements of the converter at increasing reverse displacement current of a choke, which corresponds the theoretical requirement. Developed method, algorithm and program for the calculation of RMS current through elements of the power circuit of converter can be used for solving design problems of the charge/discharge device which based on the scheme of reversing up/down converter with the switching mode of power transistors at zero-voltage, and for solving the problem of minimizing the total static and dynamic energy losses in the converter.

Keywords: charge-discharge unit, reversing a buck – boost converter, zero voltage switching of power transistors.

Введение. К зарядно-разрядным устройствам (ЗРУ) в автономных системах электропитания предъявляются повышенные требования по коэффициенту полезного действия и массогабаритным характеристикам. Для повышения КПД в современных устройствах силовой электроники широко применяются силовые ключи на основе транзисторов, переключаемых при нуле напряжения (ZVS) или при нуле тока. Обеспечение возможности переключения силовых ключей при нуле напряжения или тока достигается введением

в состав силового устройства специальных снабберов, как правило, в виде совокупности индуктивных и емкостных элементов и полупроводниковых приборов [1–5]. Однако введение дополнительных элементов негативно сказывается на массогабаритных характеристиках и показателях надёжности работы ЗРУ, в связи с чем особый интерес представляет применение в ЗРУ схемы силовой цепи, приведенной на рис. 1, при использовании алгоритма её функционирования, предложенного в [6; 7]. В силовой цепи ЗРУ в составе каждого из транзисторов VT1–VT4 пунктиром показаны паразитные антипараллельные диоды D_1–D_4 и выходные ёмкости $C_{oss.1}$–$C_{oss.4}$.

Переключение силовых транзисторов в режиме ZVS обеспечивается специальным алгоритмом [7], который поясняется временными диаграммами, приведёнными на рис. 2. На временных диаграммах показан ток $i_L(t)$ дросселя L и сигналы управления $U_{\text{у.1}}$–$U_{\text{у.4}}$ транзисторами VT1–VT4 для случая, когда напряжение U_1 на стороне 1 ЗРУ меньше напряжения U_2 на стороне 2 и энергия передаётся со стороны 1 на сторону 2. Переключение транзисторов в каждой из пар на стороне 1 и стороне 2 ЗРУ производится в окрестности моментов времени t_0–t_3 в соответствии с сигналами управления $U_{\text{у.1}}$–$U_{\text{у.4}}$. Причём сначала выключается один из транзисторов пары, а затем, по истечении некоторого изменяемого времени, производится включение другого транзистора пары. Рассмотрим переключение транзисторов в режиме ZVS на примере пары из транзисторов VT1 и VT2.

На интервале времени, предшествующем моменту t_0, ток i_L в дросселе L поддерживается на уровне $I_0 < 0$, называемом обратным током смещения, т. е. имеет направление, противоположное показанному на рис. 1. Несколько ранее момента времени t_0 производится запирание транзистора VT2. При этом на временном интервале роста сопротивления между стоком и истоком транзистора VT2 напряжение между этими электродами принимает значение

$$U_{\text{вык.2}} = \mathrm{Q}_{c.2}/C_{oss.2}, \qquad (1)$$

где $Q_{c.2}$ – заряд, принятый паразитной выходной ёмкостью $C_{oss.2}$ транзистора VT2 на интервале роста сопротивления его электропроводного канала. Напряжение $U_{\text{вык.2}}$ существенно меньше напряжения U_1, приложенного к стороне 1 ЗРУ, однако его наличие не позволяет считать, что запирание транзистора VT2 происходит в режиме ZVS.

После запирания канала транзистора VT2 часть тока i_L дросселя продолжает поступать в выходную ёмкость транзистора $C_{oss.2}$, заряжая её, а другая часть тока i_L дросселя продолжает поступать в выходную ёмкость транзистора $C_{oss.1}$, разряжая её. При этом ёмкость $C_{oss.2}$ получает, а ёмкость $C_{oss.1}$ отдаёт энергию

$$W_c = 0,5 C_{oss} U_1^2, \qquad (2)$$

где C_{oss} – величина выходной ёмкости транзистора VT1 или VT2. Энергия, отдаваемая ёмкостью $C_{oss.1}$, опосредованно с использованием дросселя L рекуперируется в источник, питающий сторону 1 ЗРУ.

После того, как напряжение на ёмкости $C_{oss.1}$ превысит напряжение U_1, происходит отпирание антипараллельного диода D_1. При этом ток i_L дросселя проходит через диод D_1 в источник, питающий сторону 1 ЗРУ. После чего производится отпирание канала транзистора VT1. Поскольку напряжение между стоком и истоком транзистора VT1 равно напряжению на открытом диоде, то выполняется режим ZVS переключения транзистора. Переход диода D_1 в проводящее состояние и последующее отпирание канала транзистора VT1 происходит спустя некоторый интервал времени после момента времени t_0. На интервале времени от момента запирания транзистора VT2 и до момента времени отпирания транзистора VT1 ток i_L дросселя проходит через источник, питающий сторону 1 ЗРУ, отдавая в него накопленную энергию. Поэтому для обеспечения режима ZVS переключения транзистора VT1, дроссель к моменту времени t_0 должен обладать некоторой накопленной энергией W_L, и, соответственно, величина обратного тока смещения дросселя I_0 должна удовлетворять условию [7]

$$|\mathrm{I}_0| \geq \max(U_{1.\max}, U_{2.\max})\sqrt{C_{oss}/L}, \qquad (3)$$

где $U_{1.\max}$ и $U_{2.\max}$ – соответственно, максимально возможные значения напряжений на стороне 1 и стороне 2 ЗРУ; L – индуктивность дросселя L.

Переключение пар транзисторов в окрестностях моментов времени t_1–t_3 на сторонах 1 и 2 ЗРУ производится аналогично рассмотренному выше переключению пары из транзисторов VT1 и VT2 в окрестности момента времени t_0, с накоплением энергии в выходной ёмкости одного из транзисторов и рекуперацией энергии, ранее накопленной в выходной ёмкости другого транзистора пары в источник питания, подключенный к стороне 1 или стороне 2 ЗРУ.

В случае, когда напряжение U_1 на стороне 1 ЗРУ больше напряжения U_2 на стороне 2 и энергия передаётся со стороны 1 на сторону 2, процессы в схеме аналогичны рассмотренным. Отличие состоит в том, что на интервале времени от t_1 до t_2 продолжается рост тока дросселя. По причине симметрии схемы при соответствующей смене алгоритма управления транзисторами обеспечивается реверс потока энергии.

Постановка задачи. В соответствии с алгоритмом переключения силовых ключей [6; 7] при запирании каждого из транзисторов VT1–VT4 не обеспечивается режим ZVS в полной мере, поскольку к моменту прекращения тока через электропроводный канал напряжение между стоком и истоком транзистора успевает возрасти на некоторую величину, определяемую (1). Очевидно, что подключив параллельно выводам стока и истока каждого из транзисторов VT1–VT4 дополнительные конденсаторы, обозначенные на рис. 1 соответственно $C_{\text{д.1}}$–$C_{\text{д.4}}$, и увеличив этим ёмкость между стоком и истоком транзистора, исходя из (1), можно снизить напряжение $U_{\text{вык}}$ на транзисторе на интервале уменьшения тока через его электропроводный канал, тем самым снизив динамические потери энергии $W_{\text{выкл}}$ при запирании транзистора.

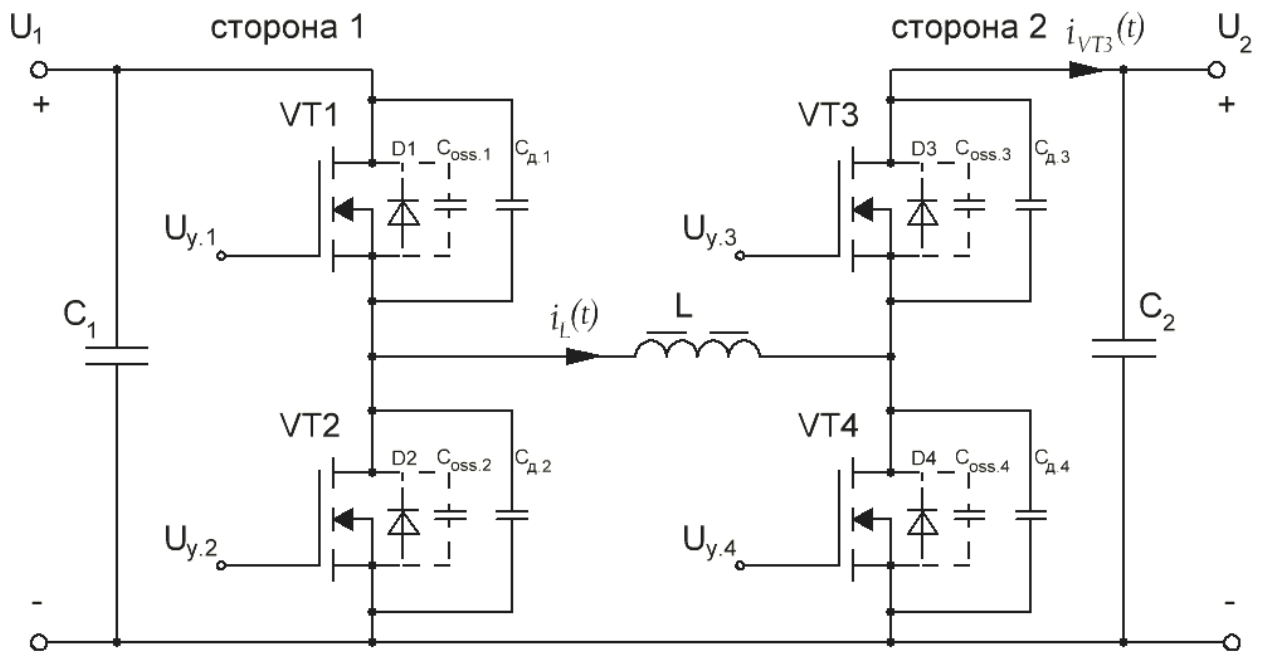


Рис. 1. Силовая цепь ЗРУ с возможностью реверса потока мощности

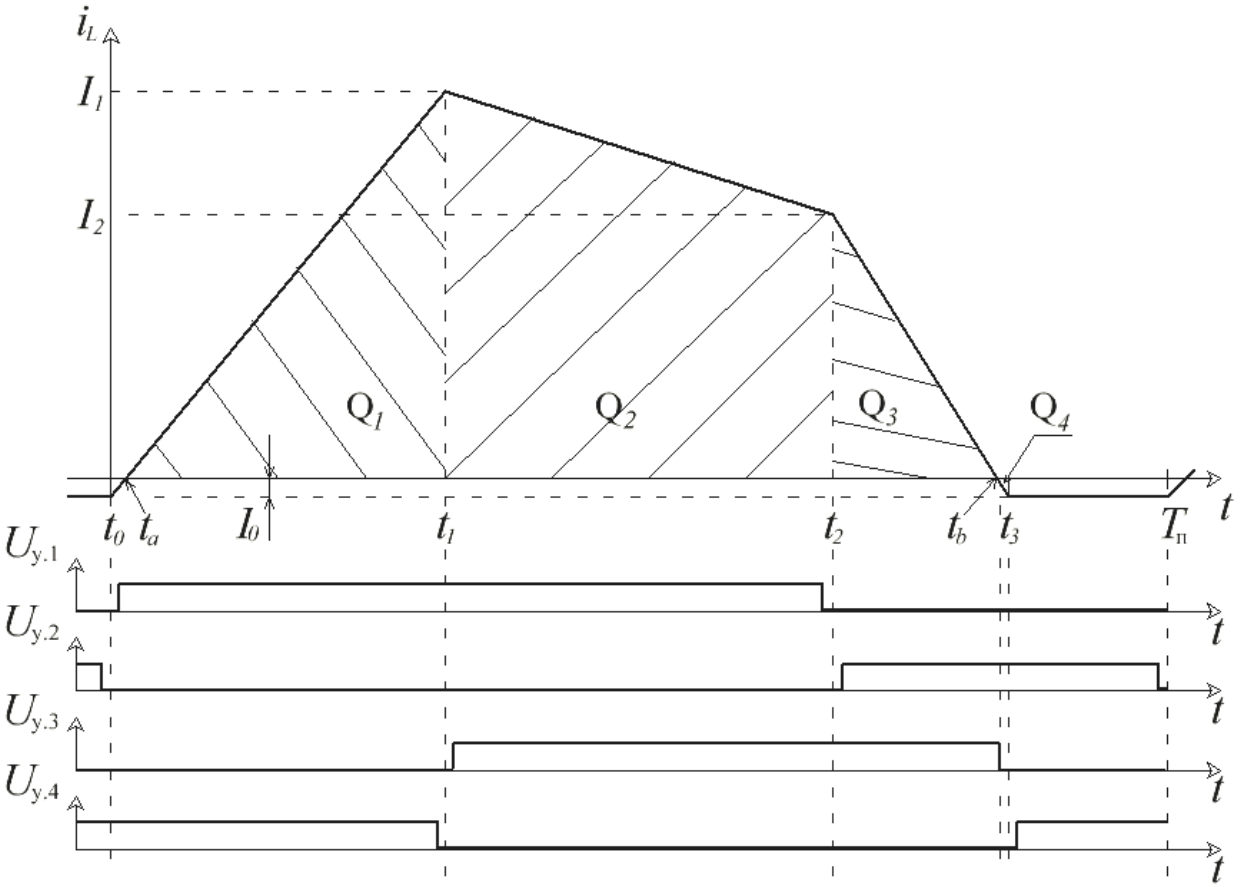


Рис. 2. Временные диаграммы тока $i_L(t)$ дросселя L и сигналов управления $U_{y.1}$–$U_{y.4}$ транзисторами VT1–VT4

При этом энергия, запасаемая в каждом из дополнительных конденсаторов $C_д$, при запирании соответствующего транзистора позже, при отпирании этого же транзистора будет рекуперирована, подобно энергии, запасаемой в выходных емкостях транзисторов. С учётом отпирания транзистора в режиме ZVS динамические потери энергии $W_{вкл}$ при его отпирании малы и существенно не изменятся, а суммарные динамические потери в транзисторе при его переключении $W_{дин} = W_{вкл} + W_{выкл}$ будут снижаться при увеличении ёмкости дополнительных конденсаторов $C_д$. Однако введение в состав силовых цепей ЗРУ дополнительных конденсаторов $C_д$, увеличивающих суммарную ёмкость между стоком и истоком транзисторов, согласно [7] потребует увеличения абсолютного значения тока I_0. В свою очередь, увеличение абсолютного значения тока I_0 приведёт к сокращению продолжительности временного интервала t_1–t_b, на котором происходит передача энергии на сторону 2, что, при условии сохранения постоянства мощности, передаваемой на сторону 2 ЗРУ, потребует увеличения амплитудного и действующего значений тока i_L через дроссель L и, соответственно, статических потерь энергии $W_{ст}$ на активном сопротивлении обмотки дросселя L и активных сопротивлениях каналов открытых транзисторов.

В ЗРУ максимальное значение КПД будет получено при достижении минимального значения суммарных потерь $W_{сум} = W_{ст} + W_{дин}$.

Для определения статических потерь энергии $W_{ст}$ необходимо решить задачу по нахождению аналитических выражений, описывающих изменение тока дросселя за период преобразования, и по разработке алгоритма и программы расчёта действующего значения тока дросселя в зависимости от величины обратного тока смещения I_0, при заданных величинах напряжений U_1 и U_2 на сторонах 1 и 2 ЗРУ, периоде преобразования T_n, индуктивности L дросселя и мощности P_2, передаваемой на сторону 2 ЗРУ. Решение этой задачи и рассмотрено ниже.

Решение задачи. Рассмотрим процессы в силовой цепи ЗРУ при следующих допущениях:

– интервалы коммутации силовых ключей пренебрежимо малы;

– напряжения U_1 и U_2 на сторонах 1 и 2 ЗРУ и период преобразования T_n неизменны;

– ток дросселя изменяется по линейному закону;

– общий интервал манипуляций $t_m = t_3 - t_0 = \text{const}$;

– падение напряжения на транзисторах, находящихся в проводящем состоянии, пренебрежимо мало.

Рассмотрим процесс передачи энергии со стороны 1 на сторону 2 ЗРУ в частном случае, когда обратный ток смещения дросселя I_0 равен 0 [7]. Временные диаграммы изменения тока дросселя ЗРУ при нулевом значении тока I_0 и для случая $U_1 < U_2$ соответствуют приведенным на рис. 2, но при задании нулевой величины тока смещения дросселя I_0. При этом моменты времени t_0 и t_a и моменты времени t_b и t_3 совпадут, т. е. $t_0 = t_a$ и $t_b = t_3$.

На интервале времени от t_0 до t_1 в проводящем состоянии находятся транзисторы VT1 и VT4. Напряжение на дросселе $U_{L.1} = U_1$, а ток дросселя возрастает со скоростью

$$I_1^{'} = U_{L.1} / L = U_1 / L. \quad (4)$$

На интервале времени от t_1 до t_2 в проводящем состоянии находятся транзисторы VT1 и VT3. Напряжение на дросселе $U_{L.2} = U_1$–U_2, а ток дросселя изменяется со скоростью

$$I_2^{'} = U_{L.2} / L = (U_1 - U_2) / L, \quad (5)$$

причём в случае $U_1 < U_2$ ток спадает. В случае если $U_1 > U_2$, ток дросселя будет возрастать. На интервале времени от t_2 до t_3 в проводящем состоянии находятся транзисторы VT2 и VT3. Напряжение на дросселе $U_{L.3} = -U_3$, а ток дросселя спадает со скоростью

$$I_3^{'} = U_{L.3} / L = -U_2 / L. \quad (6)$$

Токи дросселя I_1, I_2 и I_3, соответственно, в некоторые моменты времени t_1, t_2 и $t_3 < T_n$ с учётом (4)–(6) находятся как

$$I_1 = I_1^{'} t_1 = U_1 t_1 / L, \quad (7)$$

$$I_2 = I_1 + I_2^{'}(t_2 - t_1) = I_1 + (U_1 - U_2)(t_2 - t_1) / L, \quad (8)$$

$$I_3 = I_2 + I_3^{'}(t_3 - t_2) = I_2 - U_2(t_3 - t_2) / L. \quad (9)$$

Для рассматриваемого частного случая, когда ток дросселя $I_0 = 0$, ток дросселя I_3 в некоторый момент времени t_3 так же равен нулю. Используя выражения (7)–(9), определим момент времени t_2, который обеспечивает в момент времени t_3 равенство нулю тока I_3:

$$t_2 = U_2(t_3 - t_1)/U_1. \quad (10)$$

На сторону 2 ЗРУ энергия передаётся на интервале проводящего состояния транзистора VT3, т. е. на интервале от t_1 до $t_3 = t_в$ (см. рис. 2). Для вычисления энергии, передаваемой за период T_n на сторону 2 ЗРУ, определим заряды Q_2 и Q_3, передаваемые на интервалах от t_1 до t_2 и от t_2 до t_3 соответственно: $Q_2 = 0,5(I_1 + I_2)(t_2 - t_1)$ и $Q_3 = 0,5 I_2(t_3 - t_2)$, и суммарный заряд, передаваемый на сторону 2:

$$Q_{пер.1} = Q_2 + Q_3. \quad (11)$$

Энергия и мощность, передаваемые за период T_n на сторону 2 ЗРУ, определяется, соответственно, выражениями:

$$W_T = Q_{пер.1} U_2, \quad (12)$$

$$P_2 = W_T / T_n. \quad (13)$$

Рассмотрим процесс передачи энергии со стороны 1 на сторону 2 ЗРУ в общем случае, когда ток $I_0 < 0$. Временные диаграммы изменения тока дросселя ЗРУ при токе $I_0 < 0$ и для случая $U_1 < U_2$ приведены на

рис. 2. На всех интервалах времени скорость изменения тока дросселя соответствует случаю, когда $I_0 = 0$. Токи дросселя I_1, I_2 и I_3, соответственно, в некоторые моменты времени t_1, t_2 и $t_3 < T_n$ с учётом (4)–(6) и $I_0 < 0$ равны:

$$I_1 = I_1' t_1 + I_0 = U_1 t_1 / L + I_0, \quad (14)$$

$$I_2 = I_1 + I_2'(t_2 - t_1) = I_1 + (U_1 - U_2)(t_2 - t_1) / L, \quad (15)$$

$$I_3 = I_2 + I_3'(t_3 - t_2) = I_2 - U_2(t_3 - t_2) / L. \quad (16)$$

Используя выражения (14)–(16) и учитывая, что в момент времени t_3 ток дросселя $I_3 = I_0$, получим выражение, определяющее момент времени t_2, который обеспечивает выполнение равенства $I_3 = I_0$, которое совпадает с (10).

Момент времени t_b, в который ток дросселя равен нулю, определяется как

$$t_b = t_3 + I_0 / I_3' = t_3 + I_0 U_2 / L. \quad (17)$$

На сторону 2 ЗРУ энергия передаётся на интервале проводящего состояния транзистора VT3, за исключением интервала времени от t_b до t_3, на котором ток дросселя становится отрицательным и энергия потребляется со стороны 2 ЗРУ. Для вычисления энергии, передаваемой за период T_n на сторону 2 ЗРУ, определим заряды Q_2 и Q_3, передаваемые на сторону 2, и заряд Q_4, потребляемый со стороны 2 ЗРУ:

$$Q_2 = \frac{(I_1 + I_2)(t_2 - t_1)}{2},$$

$$Q_3 = \frac{(t_b - t_2) I_2}{2},$$

$$Q_4 = \frac{(t_3 - t_b) I_0}{2}.$$

При этом суммарный заряд, передаваемый на сторону 2:

$$Q_{\text{пер.2}} = (Q_2 + Q_3 - Q_4). \quad (18)$$

Энергия, передаваемая за период T_n на сторону 2 ЗРУ, определяется выражением

$$W_T = Q_{\text{пер.2}} U_2, \quad (19)$$

а мощность на стороне 2 ЗРУ определяется выражением (13).

Действующий ток дросселя на каждом i-м интервале фиксированного состояния силовых транзисторов ЗРУ, например интервале от t_1 до t_2, вычисляется по выражению

$$I_i = \sqrt{\frac{1}{(t_\text{к} - t_\text{н})} \int_{t_\text{н}}^{t_\text{к}} i^2(t) dt}, \quad (20)$$

где $t_\text{к}$ и $t_\text{н}$ – моменты времени, соответствующие концу и началу i-го интервала.

Действующий ток $I_\text{д}$ дросселя определяется как сумма действующих токов дросселя на каждом i-м интервале, которые совместно составляют период T_n:

$$I_\text{д} = \sum_{1}^{l=5} I_i. \quad (21)$$

Для написания программы вычисления действующего значения тока дросселя ЗРУ разработан алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 3.

В блоке 1 алгоритма производится ввод исходных данных, которыми являются напряжения U_1 и U_2, индуктивность L дросселя, период преобразования T_n и момент времени t_3, начальное значение момента времени t_1 и начальная величина его приращения Δt_1, максимальное значение тока $I_{0\max}$ и величина приращения ΔI_0 тока I_0. Далее в блоке 2 производится вычисление токов I_1, I_2 и момента времени t_2 по выражениям (7), (8) и (10) соответственно. Затем в блоке 3 производится вычисление передаваемого заряда $Q_{\text{пер.1}}$, энергии W_T и мощности P_2 по выражениям (11), (12) и (13) соответственно. В блоке 4 производится вычисление действующего тока I_i дросселя на интервалах и действующего тока $I_\text{д}$ дросселя за период по выражениям (20) и (21) соответственно и при использовании метода прямоугольников. В блоке 5 осуществляется запись результатов вычислений, а именно: величин токов I_1, I_2, передаваемого заряда $Q_{\text{пер1}}$, энергии W_T и мощности P_2. В блоке 6 выполняется присвоение току I_0 нового значения: $I_0 := I_0 + \Delta I_0$. В блоке 7 выполняется проверка выполнения условия $I_0 > I_{0\max}$. При выполнении условия осуществляется завершение процедуры, а в противном случае в блоке 8 переменной $t_{1.\text{тек}} := t_1$ присваивается текущее значение t_1, а в блоке 9 значению времени $t_1 := t_1 + \Delta t_1$ присваивается новое значение. В блоке 10 производится вычисление токов I_1, I_2 и момента времени t_2 по выражениям (16), (17) и (12) соответственно.

Затем в блоке 11 производится вычисление передаваемого заряда $Q_{\text{пер.2}}$, энергии W_T и мощности P_2 по выражениям (18), (19) и (13) соответственно.

Проверка выполнения условия $Q_{\text{пер.1}} - \Delta Q_{\text{пер.1}} < Q_{\text{пер.2}} < Q_{\text{пер.1}} + \Delta Q_{\text{пер.1}}$ производится в блоке 12. При выполнении условия осуществляется переход к выполнению блока 4. В противном случае в блоке 13 проверяется выполнение условия $t_1 < t_2$. При выполнении условия производится переход к выполнению блока 9 алгоритма. В противном случае при выполнении блока 14 величине приращения времени $\Delta t_1 := \Delta t_1/2$ присваивается новое значение, а при выполнении блока 8 значению времени $t_1 := t_{1.\text{тек}}$ присваивается новое значение и производится переход к выполнению блока 9.

В соответствии с рассмотренным алгоритмом написана программа для ПЭВМ на языке С++. При использовании этой программы и следующих начальных условиях: U_1 = 90 В и U_2 = 100 В, L = 16 мкГн, T_n = 20 мкс, t_3 = 19 мкс, t_1 = 5 мкс и Δt_1 = 0,05 мкс, $I_{0\max}$ = 5 А и ΔI_0 = 1 А, получена зависимость действующего тока $I_\text{д}$ дросселя от величины тока I_0 при

фиксированной мощности P_2 = 928,5 Вт, передаваемой на сторону 2 ЗРУ, приведённая на рис. 4. При тех же начальных условиях и новых значениях U_1 = 80 В и U_1 = 70 В получены зависимости действующего тока $I_д$ дросселя от величины тока I_0 при той же фиксированной мощности P_2 = 928,5 Вт, также приведённые на рис. 4.

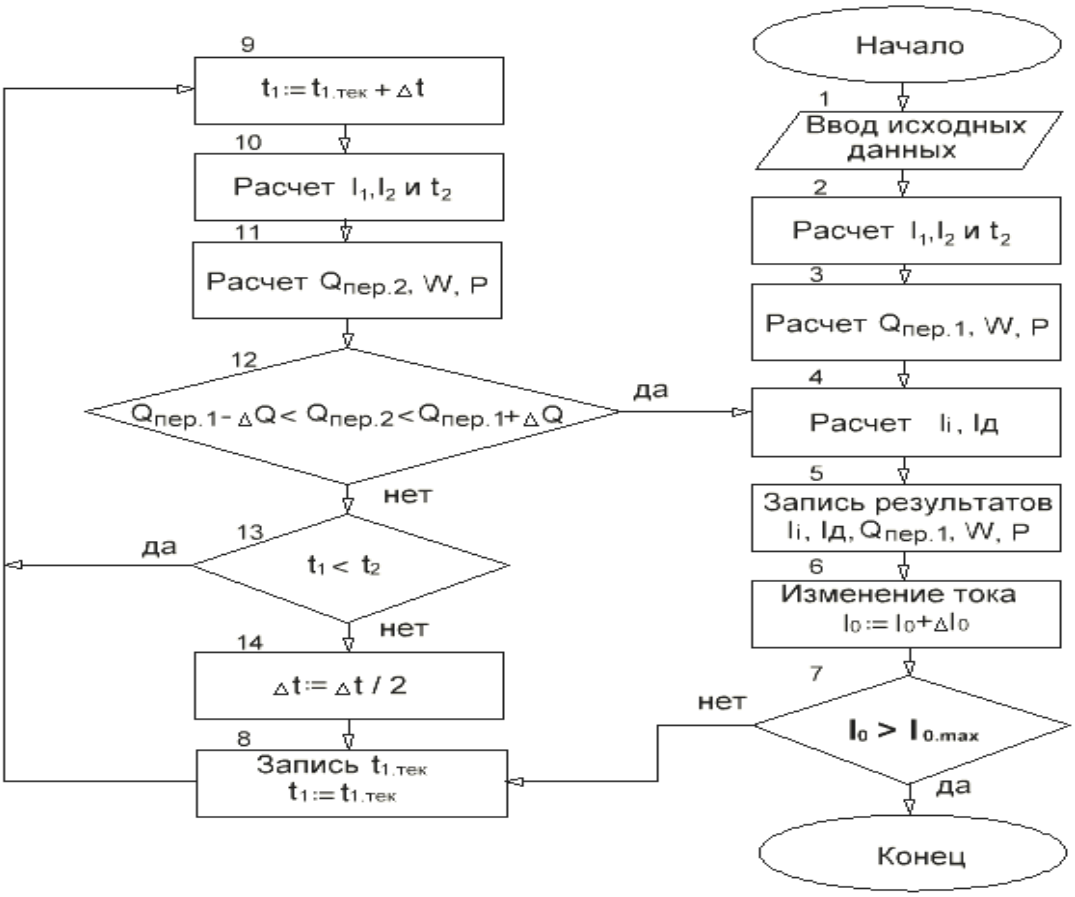


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления зависимости действующего тока $I_д$ от обратного тока I_0

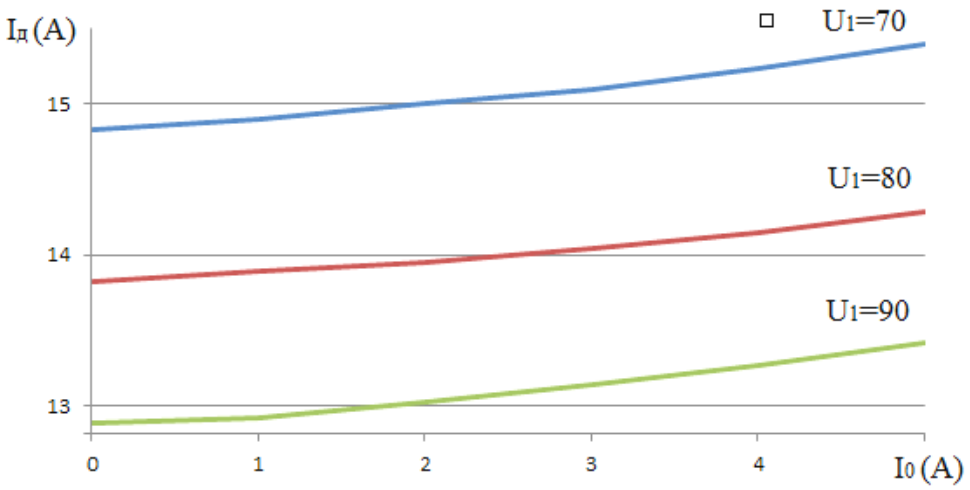


Рис. 4. Пример зависимости действующего тока $I_д$ от обратного тока I_0

Заключение. Для зарядно-разрядного устройства, выполненного по схеме реверсивного понижающе-повышающего преобразователя с режимом коммутации силовых транзисторов при нуле напряжения, разработаны методика и алгоритм вычисления действующего тока через элементы силовой цепи преобразователя от параметров элементов силовых цепей и параметров процесса преобразования энергии, в частности, от обратного тока смещения дросселя, обеспечивающего режим коммутации силовых транзисторов при нуле напряжения. В соответствии с разработанным алгоритмом вычисления действующего тока написана программа для ПЭВМ, применение которой позволило получить зависимости действующего тока через элементы силовой цепи преобразователя от обратного тока смещения дросселя для ряда фиксированных параметров процесса преобразования. Анализ полученных зависимостей показал рост действующего тока через элементы силовой цепи преобразователя при увеличении обратного тока смещения дросселя, что соответствует теоретическим предположениям. Разработанные методика, алгоритм и программа вычисления действующего тока через элементы силовой цепи преобразователя могут быть использованы для решения задачи минимизации суммарных статических и динамических потерь энергии в преобразователе.

Библиографические ссылки

1. Поликарпов А. Г, Сергиенко Е. Ф. Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА. М. : Радио и связь, 1989.

2. Imbertson P., Mohan N. New PWM Converter Circuits Combining Zero Switching Loss With Low Condacting Loss, INTELEC' 90, 1990.

3. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М. : Техносфера, 2005.

4. Hua G., Leu C. S., Lee F. C. Novel zero-voltage transition PWM converters // in Proc. IEEE PESC. 1992, P. 55–61.

5. Yuan X., Barbi I. Analysis, designing and experimentation of a transformer assistedPWMzero voltage switching inverter // IEEE Trans. Power Electron. 2000. Vol. 15. P. 72–83.

6. Waffler S., Kolar J. W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck+boost converters // in Proc. 7th Intern. Conf. on Power Electronics ICPE '07 (22–26 Oct. 2007). P. 889–894.

7. Waffler S., Kolar, J. W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck+boost converters // IEEE Trans. Power Electron. 2009. Vol. 24, no. 6. P. 1589–1599.

References

1. Polikarpov A. G., Sergienko E. F. *Odnotaktnyye preobrazovateli napryazheniya v ustroystvakh elektropitaniya REA.* [Single-ended voltage converters in power devices CEA]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989.

2. Imbertson P., Mohan N. New PWM Converter Circuits Combining Zero Switching Loss With Low Condacting Loss, INTELEC' 90, 1990.

3. Melyoshin V. I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika*. [Transistor converter equipment]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005.

4. Hua G., Leu C. S., Lee F. C. Novel zero-voltage transition PWM converters, in *Proc. IEEE PESC*, 1992, p. 55–61.

5. Yuan X., Barbi I. Analysis, designing and experimentation of a transformer assisted PWM zero voltage switching inverter, *IEEE Trans. Power Electron.*, Jan. 2000, vol. 15, p. 72–83.

6. Waffler S., Kolar J. W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck+boost converters, in Proc. 7th Intern. Conf. on Power Electronics ICPE'07, 22–26 Oct. 2007, p. 889–894.

7. Waffler S., Kolar J. W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck+boost converters, *IEEE Trans. Power Electron.,* 2009.vol. 24, no. 6, p. 1589–1599.

© Краснобаев Ю. В., Захаров В. В, Карнаухов М. А., 2014

УДК 519.87

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 107–113

О КОМПЬЮТЕРНОМ ИССЛЕДОВАНИИ *Н*-МОДЕЛЕЙ

А. В. Медведев[1], Е. Д. Михов[2]

[1] Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru; edmihov@mail.ru

Исследуется проблема моделирования дискретно-непрерывных процессов, имеющих «трубчатую» структуру в пространстве входных-выходных переменных. При этом рассматривается достаточно общая схема исследуемого процесса, включающая в себя не только входные-выходные переменные, но и промежуточные. Обращено внимание на существенно важный фактор, который состоит в том, что изменение входных переменных может осуществляться через различные интервалы времени. Это вызвано тем, что различные выходные переменные контролируются электрическими средствами, в результате химических анализов, а также физико-механических испытаний. В этой связи приведены различные модели для отличающихся компонент выхода объекта. Кратко анализируется вопрос идентификации в узком и широком смысле. Приводится рекуррентный алгоритм оценки параметров адаптивных моделей, основанной на методе стохастических аппроксимаций. Моделирование процессов этого класса существенно отличается от общепринятых параметрических моделей, представляющих собой поверхности в том же пространстве. При построении обучающихся параметрических моделей «трубчатых» процессов необходимо использование соответствующих непараметрических индикаторов. Приведены также рекуррентные алгоритмы оценки параметров, учитывающие индикаторы в соответствующих параметрических моделях. Можно отметить, что Н-модели являются более общими, по сравнению с традиционными. То есть, если исследуемый процесс не имеет «трубчатую» структуру, то Н-модель в этом случае переходит в класс общеизвестных моделей безынерционных систем. Таким образом, адаптивные модели безынерционных процессов несколько изменяются, в отличие от общепринятых. Рассмотрены некоторые частные примеры моделирования «трубчатых» процессов, из которых следует, что «трубчатые» процессы протекают в пространстве дробной размерности. Приводится случай функции многих переменных и анализируется ситуация, когда с течением времени эти переменные могут «исчезать» и «возникать» вновь. Методом статистического моделирования было проведено численное исследование Н-моделей при различных объемах выборки измерений входных-выходных переменных и различных уровнях помех. В результате этого исследования показано, что размерность пространства, в котором протекает процесс, не только дробна, но и изменяющаяся. Оказывается, что вычисление размерности дробного пространства может осуществляться различными путями.

Ключевые слова: априорная информация, идентификация, непараметрическая модель, непараметрические алгоритмы, Н-модели, пространство дробной размерности.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 107–113

ABOUT COMPUTER RESEARCH OF H MODELS

A. V. Medvedev[1], E. D. Mihov[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, Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru; edmihov@mail.ru

A modeling of discrete-continuous processes with "tubular" structure in space "input – output" variables is considered. Moreover general scheme of the test process, including not only the input-output variables but also intermediate is discussed. Attention is drawn to the essential factor which shows that a change of input variables carries out through

various time intervals. This is due to various output variables controlled by electrical means, as a result of chemical analysis and physico-mechanical tests. In this regard the various component models for different process output are given. The question is analyzed in the identification of "narrow" and "broad" sense. Recursive algorithm provides estimates of the parameters of adaptive models based on stochastic approximation method. Modelling of processes of this class differs significantly from conventional parametric models representing the surface in the same space. When constructing students' parametric models "tubular" processes require the use of appropriate non-parametric indicators. The recurrent algorithms estimate the parameters that take into account the relevant indicators in parametric models are also given. It may be noted that the H-pattern is more common in comparison with conventional. That is, if the test process does not have "tubular" structure, then H-model in this case, goes to the class of well-known models of free-wheeling systems. Thus, the adaptive models freewheeling processes change somewhat, unlike conventional. Some special examples of modeling "tubular" processes, from which it follows that the "tubular" processes take place in the space of fractional dimension. We present the case of functions of several variables and analyzed the situation where, over time these variables can "disappear" and "occur" again. Statistical modeling method, has been carried out numerical study of H-models with different sample sizes measuring input-output variables and different levels of noise. As a result of this study shows that the dimension of the space in which the process takes place, not only fractionally, but also changing. It turns out that the calculation of fractional dimension space can be done in different ways.

Keywords: a priori information, identification, nonparametric model, nonparametric algorithms, H-model, fractional dimension space.

Введение. Идентификация многих стохастических объектов часто сводится к идентификации статических систем с запаздыванием. Обусловлено это тем, что некоторые выходные переменные объекта контролируются через значительно большие интервалы времени, чем входные, и существенно превышают постоянную времени объекта. Например, ряд переменных измеряются электрическим способом (в этом случае дискретность контроля Δt может быть достаточно мала), а другие переменные контролируются в результате химического анализа или физико-механических испытаний (в этом случае дискретность контроля ΔT – велика, т. е. $\Delta T >> \Delta t$).

Наиболее общая схема исследуемого дискретно-непрерывного процесса может быть представлена на рис. 1 [1], где приняты следующие обозначения: A – неизвестный оператор объекта; $x(t)$, $z(t)$, $q(t)$ – выходные переменные процесса; $u(t)$ – управляющее воздействие; $\mu(t)$ – входная неуправляемая, но измеряемая переменная процесса; $\lambda(t)$ – входная неуправляемая и неизмеряемая переменная процесса; $\xi(t)$ – случайное воздействие; $\omega^i(t)$: $i = 1, 2, ..., k$ – переменные процесса, контролируемые по длине объекта; (t) – непрерывное время; H^{μ}, H^u, H^x, H^z, H^q, H^{ω} – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных; μ_t, u_t, x_t, $z_{\Delta T}$, q_T, ω_t – означают измерение $\mu(t)$, $u(t)$, $x(t)$, $z(t)$, $q(t)$, $\omega(t)$ в дискретное время; $h^{\mu}(t)$, $h^u(t)$, $h^x(t)$, $h^z(t)$, $h^q(t)$, $h^{\omega}(t)$ со значком вверху – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

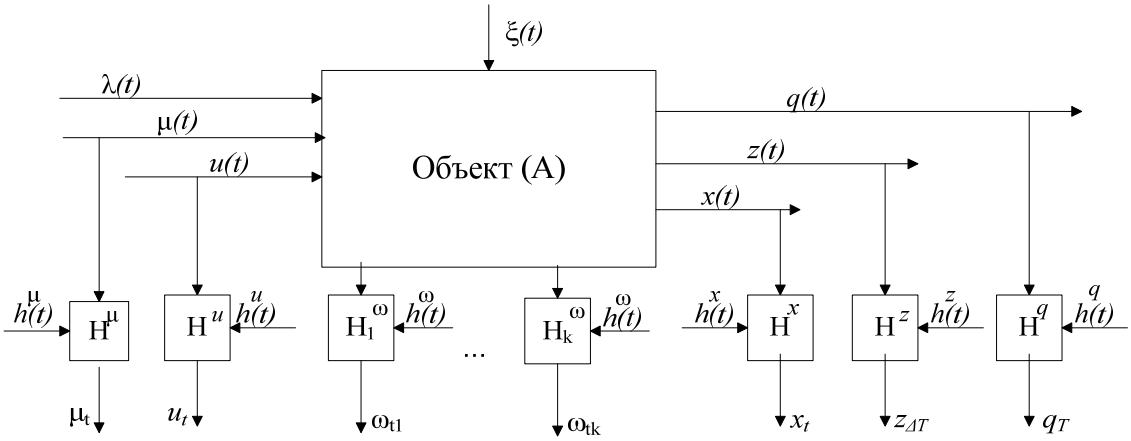


Рис. 1. Общая схема исследуемого процесса

Отметим существенное отличие выходных переменных $z(t)$, $q(t)$ и $x(t)$, представленных на рис. 1. Выходная переменная $x(t)$, равно как и входные, контролируется через интервалы времени Δt, $q(t)$ контролируется через существенно большие интервалы времени ΔT, z – через T, $T \gg \Delta T \gg \Delta t$. С практической точки зрения для исследуемого процесса часто наиболее важным является контроль переменных $z(t)$.

В этом случае значения выходных переменных зависят от входных и $\omega(t)$ (дополнительная информация) следующим образом:

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), \lambda(t), \xi(t), t). \quad (1)$$

При моделировании подобных процессов, учитывая различную дискретизацию контроля измерений $x(t)$, $q(t)$ и $z(t)$, при прогнозировании $q(t)$ и $z(t)$ естественно использовать весь набор переменных, влияющих на прогноз $x(t)$, $q(t)$, $z(t)$:

$$\hat{x}(t) = \hat{A}(u(t), \mu(t), \omega(t), t), \quad (2)$$

$$\hat{q}(t) = \hat{A}(u(t), \mu(t), \omega(t), \hat{x}(t), t), \quad (3)$$

$$\hat{z}(t) = \hat{A}(u(t), \mu(t), \omega(t), \hat{x}(t), \hat{q}(t), t). \quad (4)$$

Учитывая большие значения ΔT и T, значительно превышающие постоянные времени объекта, при моделировании придется учитывать, что процессы относятся к классу статических с запаздыванием, что значительно повышает их роль и значение в задачах идентификации и управления стохастическими системами.

Для дальнейшего изложения, без нарушения общности «свернем» все входные и выходные переменные в соответствующие векторы. Тогда исследуемый объект может быть представлен статическим с запаздыванием. Такой процесс целесообразно по соответствующему каналу представить в виде

$$x(t) = f(u(t-\tau), \xi(t)), \quad (5)$$

где $x(t)$ – выходная переменная объекта; $u(t-\tau)$ – совокупная входная переменная; τ – запаздывание; $\xi(t)$ – случайное возмущение, действующее на объект; t – непрерывное время.

Идентификация в узком и широком смысле. При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в узком смысле. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе, на основании имеющейся априорной информации определяется параметрический класс оператора объекта A^{α}, например:

$$\tilde{x}_{\alpha}(t) = A^{\alpha}(u(t), \alpha), \quad (6)$$

где A^{α} – параметрическая структура модели; α – вектор параметров.

На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$, s – объем выборки. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько «удачно» определен оператор (6).

Идентификация в широком смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например, линейности процесса или типа нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$ [2; 3]:

$$\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s), \quad (7)$$

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, \ldots, x_s)$, $\vec{u}_s = (u_1, u_2, \ldots, u_s)$ – временные векторы. Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры. Тем самым можно утверждать, что идентификация в этом случае, а это вариант идентификации в широком смысле, является более адекватной реальным задачам практики.

Идентификация статической системы. Пусть $u = (u_1, \ldots, u_k) \in \Omega(u) \subset R^k$, $x \in \Omega(x) \subset R^1$. Вообще говоря, каждая компонента вектора $u_i \in [a_i; b_i]$, $i = \overline{1,k}$, а $x \in [c; d]$. При исследовании реальных процессов значения коэффициентов $\{a_i, b_i, c, d\}$, $i = \overline{1,k}$, всегда известны. В технологических процессах значения этих коэффициентов регламентируются технологическим регламентом (картой). В дальнейшем, без нарушения общности эти интервалы примем единичными [1], тогда $\Omega(u)$ – единичный гиперкуб, $\Omega_k(u) = [0;1]$, т. е. $u \in [0;1]$, $\Omega_{k+1}(u,x) = [0;1]$, $(u,x) \in \Omega_{k+1}(u,x)$.

Адаптивная модель в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{x}_s(u) = \hat{f}(u, \alpha_s). \quad (8)$$

Наиболее «слабым» местом здесь является выбор параметрической структуры модели. Если на первом этапе допущена достаточно грубая ошибка, то в итоге полученная модель вряд ли будет удовлетворительной. Эта проблема достаточно подробно обсуждалась в [2; 3]. Обратим внимание на то, что модели класса (8) представляют собой гиперповерхности в пространстве входных-выходных переменных объекта, т. е. $(u,x) \in \Omega(u,x) \subset R^{k+1}$.

Если исследуемый процесс имеет «трубчатую» структуру [2], то модель (8) необходимо подкорректировать следующим образом:

$$\hat{x}_s(u) = I_s(u)\hat{f}(u, \alpha_s) \quad (9)$$

либо:

$$\hat{x}_s(u) = I_s(u)\sum_{j=1}^{N}\alpha_{sj}\varphi_j(u), \qquad (10)$$

где $\varphi_j(u)$ – система линейно независимых функций; индикатор $I_s(u)$ имеет вид

$$I_s(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } u \in \Omega_s^H(u); \\ 0, & \text{если } u \overline{\in} \Omega_s^H(u). \end{cases} \qquad (11)$$

Заметим лишь, что, вообще говоря, область $\Omega^H(u)$ нам не известна, а известна лишь выборка $\left\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\right\}$. Если индикатор равен нулю, то оценка $\hat{x}_s(u)$ не может быть вычислена, т. е. при таких значениях компонент вектора $u \in \Omega(u)$ процесс протекать не может. Если индикатор $I_s(u)$ при любом значении $u \in \Omega(u)$ равен единице, то модель (9) совпадает с (8). В качестве оценки индикатора $I_s(u)$ можно принять следующее приближение:

$$I_s(u) = \operatorname{sgn}\sum_{i=1}^{s}\Phi\left(c_s^{-1}\left(x_s(u) - x_i\right)\right)\prod_{j=1}^{k}\Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right), \qquad (12)$$

где

$$x_s(u) = \sum_{i=1}^{s}x_i\prod_{j=1}^{k}\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) / \sum_{i=1}^{s}\prod_{j=1}^{k}\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)), \qquad (13)$$

а параметр размытости c_s и колоколообразная функция $\Phi(\cdot)$ удовлетворяют некоторым условиям [2].

Таким образом, при известном значении $u = u' \in \Omega(u)$ сначала строится оценка $x_s(u = u')$ по формуле (13), затем вычисляется индикатор $I_s(u)$, и только на следующем этапе используются модели (9) или (10), если индикатор оказался равным единице. Если же индикатор равен нулю, то это означает, что хотя $u' \in \Omega(u)$, но $u' \overline{\in} \Omega^H(u)$, т. е. компоненты вектора $u = u' = (u_1', \ \ldots, u_k')$ определены неверно, иными словами, реально протекающий «трубчатый» процесс не соответствует совокупности заданных значений компонент вектора $u = u'$. Причины этого могут заключаться в том, что компоненты вектора $u = u' = (u_1', \ \ldots, u_k')$ выбраны неверно либо измерены со значительной погрешностью типа «выброс». Конечно же, это справедливо только при условии, что мы располагаем представительной выборкой $\left\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\right\}$. Следует заметить, что использование традиционных моделей типа (8) позволит получить оценку $\hat{x}(u = u')$, которая, естественно, будет далека от реальности.

Естественно считать, что процесс идентификации объекта в параметрической постановке также следует осуществлять с учетом «трубчатой» структуры объекта. Примем класс моделей «трубчатого» процесса в виде

$$\hat{x}(u) = I(u)\sum_{j=1}^{N}\alpha_j\varphi_j(u), \qquad (14)$$

где $\varphi_j(u)$, $j = \overline{1,N}$ – система выбранных линейно независимых функций.

Сформируем критерий оптимальности:

$$R(\alpha) = M\left\{(x(u) - I(u)\sum_{j=1}^{N}\alpha_j\varphi_j(u))^2\right\}. \qquad (15)$$

Наша цель состоит в отыскании таких $\alpha^* = (\alpha_1^*, \ \ldots, \alpha_N^*)$, что

$$R(\alpha^*) = \min_{\alpha} R(\alpha). \qquad (16)$$

Решение задачи (16) дается системой рекуррентных соотношений:

$$\begin{gathered}\alpha_s^l = \alpha_s^{l-1} + \gamma_s^l(x_s - I_s(u_s)\times \\ \times\sum_{j=1}^{N}\alpha_{s-1}^j\varphi_j(u_s))\varphi_j(u_s)I_s(u_s), l = 1, \ \ldots, N.\end{gathered} \qquad (17)$$

В качестве оценки $I(u_s)$ примем приближение

$$I_s(u_s) = \operatorname{sgn}\sum_{i=1}^{s}\prod_{j=1}^{k}\Phi\left(\frac{u_s - u_i^j}{c_s}\right). \qquad (18)$$

Ясно, что сходимость α_s к α_s^* следует при $s \to \infty$.

Об одной особенности моделирования «трубчатых» процессов. Приведем следующий пример, имеющий отношение к идентификации безынерционной системы. Рассмотрим следующий простой частный случай. Пусть объект описывается уравнением

$$x(u) = f(u_1, u_2, u_3), \qquad (19)$$

где трехмерный вектор $u = (u_1, u_2, u_3) \in R^3$ является входной переменной; $x \in R^1$ – выходная переменная. Традиционный путь построения модели процесса, описываемого зависимостью (19), состоит в определении класса параметрических зависимостей $\hat{x}(u) = \hat{f}(u_1, u_2, u_3, \alpha)$ и последующей оценки параметров α тем или иным способом по выборке наблюдений (u_i, x_i), $i = \overline{1,s}$, где s – объем выборки. Проанализируем этот пример с разных точек зрения. Пусть компоненты вектора входных переменных $u = (u_1, u_2, u_3)$ стохастически никак не связаны, т. е. независимы. В этом случае естественно использовать обычный традиционный прием, описанный выше. Теперь предположим, что объективно компоненты вектора входных переменных функционально связаны, например,

$$u_2 = \varphi_1(u_1)\,,\ u_3 = \varphi_2(u_2) = \varphi_2(\varphi_1(u_1))\,. \qquad (20)$$

Естественно, исследователь не знает о существовании зависимостей (20). В противном случае можно было бы сделать подстановку (20) в (19) и получить следующую зависимость x уже от одной переменной u_1 вида

$$x(u) = f(u_1, \varphi_1(u_1), \varphi_2(\varphi_1(u_1)))\,. \qquad (21)$$

Таким образом, зависимость (19) в приведенных выше условиях может быть сведена к одномерной зависимости x от u_1. В случае, если зависимость u_3 от u_2 объективно отсутствует, то (19) легко приводится к виду

$$x(u) = f(u_1, \varphi_1(u_1), u_3)\,, \qquad (22)$$

т. е. к двумерной зависимости x от u_1, u_3. Отсюда можно заключить, что при наличии функциональной зависимости между компонентами вектора u мы получаем зависимость x от u, в данном случае одно-, двух-, трехмерные. Подчеркнем еще раз, что о наличии функциональных зависимостей между компонентами вектора входных переменных исследователю не известно. Просто мы проанализировали случай «Если бы…». А теперь проанализируем наиболее интересный случай, имеющий непосредственное отношение к *H*-процессам [1]. Пусть u_3 и u_2, хотя и неизвестным образом, но стохастически связаны [2]. Подчеркнем – стохастически, а не функционально. Вернемся еще раз к анализу того, что произошло. Во-первых, если компоненты вектора u независимы, то исследуемый процесс описывается функцией трех переменных. Если две компоненты вектора входных переменных u связаны функциональной зависимостью, то процесс описывается функцией двух переменных. Наконец, если две переменные связаны стохастически, то процесс описывается функцией более чем двух переменных, но менее чем трех?! Можно считать, что мы приходим к зависимости от дробного числа переменных и, следовательно, к пространству дробной размерности. Например, Б. Мондельброт в [4] замечает: «Кровеносная система человека – пульсирующая, живая – имеет размерность 2.7». Дробная размерность пространств, по-видимому, впервые была отмечена в работах Хаусдорфа и Безиковича.

Рассмотрим следующую ситуацию. Из простоты соображений пусть интересующий нас процесс описывается (19).

В случае стохастической зависимости между переменными $u_2(u_1)$, $u_3(u_1)$ по имеющимся в наличии обучающим выборкам можно вычислить квадратичную ошибку прогноза $u_{2s}(u_1)$, $u_{3s}(u_1)$. Здесь $u_{2s}(u_1)$, $u_{3s}(u_1)$ есть непараметрические оценки [1]:

$$\delta_{21} = \sum_{i=1}^{s}\left(u_2 - u_{2s}(u_1)\right)^2 \Big/ \sigma_{u_2}^2\,,$$
$$\delta_{31} = \sum_{i=1}^{s}\left(u_3 - u_{3s}(u_1)\right)^2 \Big/ \sigma_{u_3}^2\,. \qquad (23)$$

«Силу» стохастической связи λ между двумя произвольными переменными можно вычислить, например, по формуле:

$$\lambda = 1 - \delta\,. \qquad (24)$$

Отсюда видно, что самая сильная стохастическая связь (функциональная) равна 1, отсутствие связи имеет место при $\lambda = 0$, а при стохастической зависимости между входными переменными $0 < \lambda < 1$.

Если в более общем случае такого рода процессы интерпретировать как функции многих переменных, то изменчивость этой функции во времени может быть показана, например, на нижеследующей цепочке соотношений, действующих во времени [1]:

$$\begin{array}{ll}
x = f(t, \mathbf{u_1}, \mathbf{u_2}, \mathbf{u_3}, \mathbf{u_4}, \mathbf{u_5}) & \text{– T1} \\
x = f(t, u_1, \mathbf{u_2}, \mathbf{u_3}, u_4, \mathbf{u_5}) & \text{– T2} \\
x = f(t, u_1, \mathbf{u_2}, \mathbf{u_3}, u_4, \mathbf{u_5}) & \text{– T3} \\
x = f(t, u_1, \mathbf{u_2}, \mathbf{u_3}, u_4, \mathbf{u_5}) & \text{– T4} \\
x = f(t, \mathbf{u_2}, \mathbf{u_3}, u_4, \mathbf{u_5}, u_6) & \text{– T5} \\
x = f(t, \ , \mathbf{u_2}, \mathbf{u_3}, u_4, \mathbf{u_5}, u_6) & \text{– T6} \\
x = f(t, u_1, \mathbf{u_2}, u_3, u_4, \mathbf{u_5}, u_6) & \text{– T7} \\
x = f(t, u_1, \mathbf{u_2}, u_3, u_4, \mathbf{u_5}, u_6) & \text{– T8} \\
x = f(t, u_1, \mathbf{u_2}, u_3, u_4, \mathbf{u_5}, \mathbf{u_6}, u_7) & \text{– T9}
\end{array} \qquad (25)$$

Поясним наши обозначения. Наиболее темным цветом ($\mathbf{u_1}$) обозначены переменные, которые оказывают самое сильное влияние на x (функциональная зависимость). Менее темное обозначение (u_1) говорит о более слабом влиянии переменной на x (возможно, достаточно сильная стохастическая зависимость), более слабое влияние на x оказывают u_1 и $u1$. T*i*, где $i = \overline{1,9}$ – это интервалы времени существования соответствующих зависимостей. Таким образом, в реально действующих процессах подобного рода роли значения переменных изменчивы. Из приведенных выше зависимостей видно, что некоторые переменные могут утрачивать свое значение, а некоторые утрачивают, а потом восстанавливаются, а некоторые новые переменные появляются впервые, как, например, u6, u7.

Если сохранить математический «облик» интерпретации функции многих переменных как точку многомерного пространства, то мы приходим к наличию пространства дробной размерности F^{λ}. Вычисление размерности F^{λ} можно осуществить, например, следующим образом

$$\dim F^{\lambda} = (n+1) - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i,i+1}\,, \qquad (26)$$

где n – размерность вектора u; $\lambda_{i,i+1}$ означает «силу» стохастической связи между u_i и u_{i+1}.

В принципе, могут быть предложены и другие схемы вычисления размерности пространства. Например,

$$\dim F_1^{\lambda} = (n+1) - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{1,i+1}\ , \qquad (27)$$

где $\lambda_{1,i+1}$ – зависимость всех компонент вектора u от одной компоненты u_1.

При достаточно внимательном анализе разложения функций в ряды уместно вспомнить фразу В. И. Арнольда из замечательной книги «Теория катастроф»: «Вычисление в этих прикладных* исследованиях обычно проводились без общей теории за счет правильного отбрасывания одних членов ряда Тейлора и оставления других, наиболее важных. Из физиков, особенно систематически применявших теорию катастроф до ее возникновения, стоит особо выделить Л. Д. Ландау. В его руках искусство отбрасывать ”несущественные” члены ряда Тейлора, сохраняя меньшие по величине ”физически важные” члены, дало много включаемых в теорию катастроф результатов» [5].

Вычислительные эксперименты. Пусть процесс описывается функцией $x = f(u_1, u_2)$ и находится под воздействием помехи $\xi(t)$. Примем обучающую выборку равной 500, входные переменные – независимы (рис. 2), также покажем зависимость размерности пространства F^{λ} от s (рис. 3).

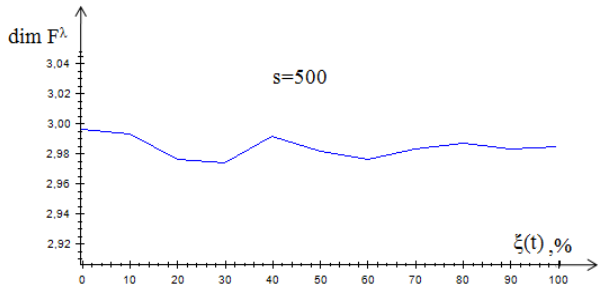


Рис. 2. Зависимость размерности пространства F^{λ} от уровня помех

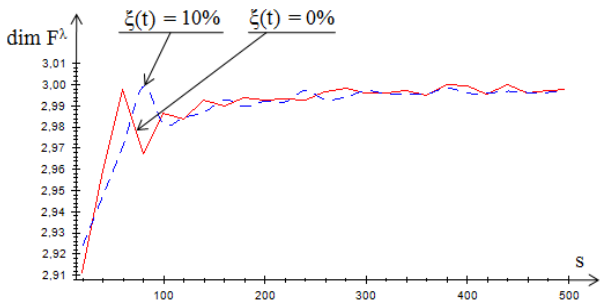


Рис. 3. Зависимость размерности пространства F^{λ} от объема выборки

На рис. 2 видно, что при независимых входных переменных размерность процесса близка к 3.

Рис. 3 иллюстрирует, что при небольшой выборке размерность F^{λ} уменьшается, но при увеличении выборки размерность пространства F^{λ} близка к 3.

Рассмотрим процесс, имеющий «трубчатую» структуру, т. е. *H*-процесс.

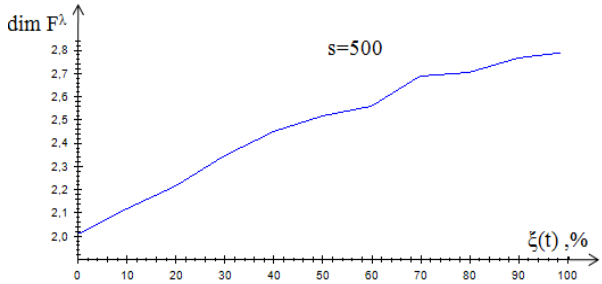


Рис. 4. Зависимость размерности пространства F^{λ} от уровня помех

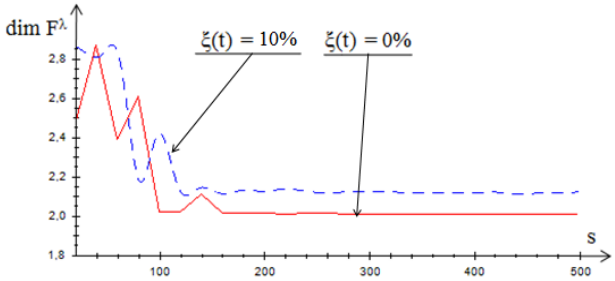


Рис. 5. Зависимость размерности пространства F^{λ} без помех и с помехой 10 %

Видно, что у *H*-процесса в этом случае размерность пространства близка к двум (рис. 4). Объясним причину данного явления.

Пусть $x = f(u_1, u_2)$, но вследствие того, что данный процесс имеет «трубчатую» структуру, $u_2 = g(u_1)$, соответственно, $x = f(u_1, u_2) = f(u_1, g(u_1))$. В итоге имеем процесс, описываемый одной переменной. При увеличении помехи связь между u_1 и u_2 ослабевает, соответственно, и размерность процесса растет.

В проведенных экспериментах (рис. 5) dim F^{λ} отличаются друг от друга, что является следствием того, что u_2 во втором эксперименте стохастически зависит от u_1. Далее проведем эксперимент, когда на входе процесса действуют 10 независимых переменных, а выход – без нарушения общности, скалярный.

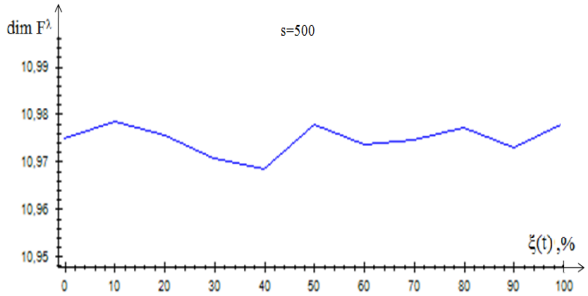


Рис. 6. Зависимость размерности пространства F^{λ} от уровня помех

* Здесь речь идет о теории упругости.

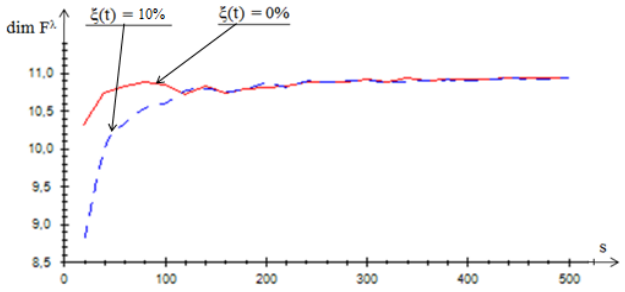


Рис. 7. Зависимость размерности пространства F^{λ} от объема выборки

На рис. 6 видно, что размерность близка к 11. Рассмотрим случаи, когда в первом на процесс действует 10 % помеха, а во втором – отсутствует.

На рис. 7 размерность пространства F^{λ}, как и следовало ожидать, приближается к 11.

Вычислим размерность пространства F^{λ} в зависимости от уровня помех, если все входные воздействия стохастически зависимы (рис. 8).

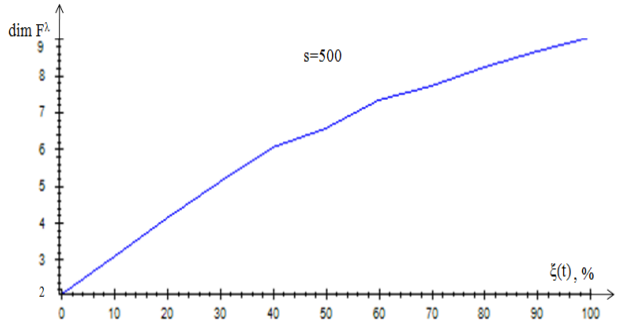


Рис. 8. Зависимость размерности пространства F^{λ} от уровня помех

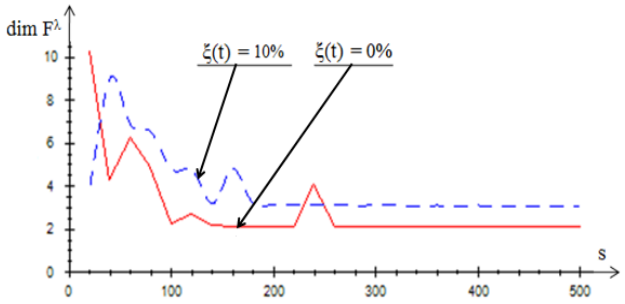


Рис. 9. Зависимость размерности пространства F^{λ} от объема выборки

Как и предполагалось, размерность пространства F^{λ} при функциональной зависимости компонент вектора входа стала равна двум. При уменьшении степени этой зависимости dim F^{λ} возрастает.

При увеличении объема выборки (рис. 9) размерность пространства F^{λ} возрастает, в связи с более точным оцениванием параметров δ.

Заключение. Был проведен анализ ситуаций, возникающих при моделировании процессов «трубчатой» структуры, которая имеет место всегда, если компоненты вектора входных переменных процесса стохастически зависимы. В этом случае традиционно используемые модели статических систем с запаздыванием неприменимы или могут приводить к значительным ошибкам. Наиболее интересным является тот факт, что мы приходим к необходимости рассмотрения пространства дробной размерности. Безусловно, интересным является факт исчезновения и появления влияния некоторых входных переменных в различные периоды времени на значения выходных переменных процесса, что тесно связано не столько с пространством дробной размерности, сколько с пространством изменяющейся размерности.

Библиографические ссылки

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

2. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Т. 2. Минск : БГУ, 1995. С. 201–206.

3. Медведев А. В. *H*-модели для безынерционных систем с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2012. № 5(45). С. 84–89.

4. Мондельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М. ; Ижевск : Ижевский ин-т компьютерных исследований: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 656 с.

5. Арнольд В. И. Теория катастроф. М. : Наука, 1990. 128 с.

References

1. Medvedev A. V. [Some notes on H-models for non-inertis systems with a delay]. *Vestnik SibGAU.* 2014, no. 2 (54), p. 24–34. (In Russ.)

2. Medvedev A. V. [Analysis of the data in the problem identification]. *Computer analysis of simulation data*. 1995, Vol. 2, p. 201–206. (In Russ.)

3. Medvedev A.V. [H-model for non-inertia systems with delay]. *Vestnik SibGAU.* 2012, no. 5 (45), p. 84–89. (In Russ.)

4. Mondelbrot B. *Fraktalnaya geometriya prirody* [Fractal Geometry of Nature]. Moscow – Izhevsk, Institute of Computer Science, NITS “Regular and Chaotic Dynamics” Publ., 2010, 656 p.

5. Arnold V. I. *Teoriya katastrof* [Catastrophe Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 128 p.

© Медведев А. В., Михов Е. Д., 2014

УДК 621.791

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 114–119

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

С. И. Пономарев, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Serg_ponom@mail.ru; eresko07@mail.ru; ereskott@mail.ru

Предлагается описание совершенствования технологии изготовления деталей и узлов аэрокосмического производства с использованием компьютерного проектирования и управления технологическими процессами. Теоретические основы и алгоритмы построения технологического процесса изготовления деталей и узлов аэрокосмической отрасли с применением различных способов соединения жаропрочных материалов, например диффузионной сваркой, проектируются на основании проведённых теоретических и экспериментальных исследований, предлагаемых авторами запатентованного способа соединения жаропрочного сплава на кобальтовой основе с керамикой на основе нитрида кремния и технологической оснастки «Установка для получения металлокерамических изделий», а также получивших регистрацию в реестре баз данных Российской Федерации атрибутивной базы данных для создания технологических процессов получения деталей аэрокосмического производства диффузионной сваркой и атрибутивной базы данных технологического оборудования, инструмента и приспособлений для механической обработки деталей аэрокосмического производства. Во время выполнения работ были решены следующие задачи: разработан алгоритм адаптивного управления технологическим процессом изготовления деталей и узлов аэрокосмической отрасли с применением диффузионной сварки в реальном масштабе времени, создана база данных материалов, применяемых для изготовления деталей и узлов аэрокосмического производства, база данных оборудования, оснастки и режимов механической обработки деталей различных типоразмеров и конфигурации и база данных оборудования, оснастки и режимов получения неразъёмных соединений из разнородных материалов диффузионной сваркой. На основании проведённых исследований и созданных баз данных приведены рекомендации для изготовления неразъёмных металлокерамических узлов, используемых в аэрокосмическом производстве. В качестве примера разработанной методики приводится проектирование технологии изготовления металлокерамического узла – ротора турбины турбонасосного агрегата. Предлагаемый способ компьютерного проектирования и управления технологическими процессами изготовления деталей и узлов значительно упрощает организационные работы и сокращает время подготовки производства при изготовлении высококачественных деталей и узлов аэрокосмического производства.

Ключевые слова: компьютерное проектирование и управление технологическими процессами, алгоритм построения технологического процесса, базы данных материалов деталей и узлов аэрокосмического производства, оборудования и технологических режимов механической обработки данных материалов, оборудования и режимов получения неразъёмных соединений из данных материалов диффузионной сваркой.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 114–119

IMPROVED TECHNOLOGY MANUFACTURING UNITS AEROSPACE INDUSTRY

S. I. Ponomarev, S. P. Eresko, T. T. Eresko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: Serg_ponom@mail.ru; eresko07@mail.ru; ereskott@mail.ru

This paper presents a description of the improvement of the technology of manufacturing parts and assemblies of aerospace production using computer-aided design and process control. Theoretical framework and algorithms for constructing process of manufacturing parts and assemblies to the aerospace industry using different connection methods of heat-resistant materials, such as diffusion bonding, designed on the basis of conducted theoretical and experimental studies, the authors proposed a patented process connection "Connection method superalloy cobalt-based ceramic based on silicon nitride" and tooling "Installation for metal products", as well as obtaining registration in the

database of the Russian Federation "Attributive database to create processes for production of aerospace components manufacturing diffusion bonding" and "Attributive database processing equipment, tools and equipment for machining aerospace parts production". During the execution of the works were solved the following problems: the algorithm of the adaptive management process of manufacturing parts and assemblies to the aerospace industry using diffusion welding in real time created: the database of materials used for the manufacture of parts and assemblies of aerospace manufacturing, the database of equipment, accessories and modes of machining parts different sizes and configurations, and the database of equipment, accessories and modes of obtaining permanent link of dissimilar materials by diffusion bonding. Based on the results, and created databases, provides guidance for the manufacture of one-piece ceramic-metal assemblies used in the aerospace industry. As an example, the developed method provides design technology of metal-ceramic assembly - the turbine rotor of the turbopump assembly. The proposed method for computer-aided design and manufacturing process control components and assemblies greatly simplifies the organization of work and reduces the pre-production in the manufacture of high quality components and assemblies of aerospace manufacturing.

Keywords: computer-aided design and process control, an algorithm for constructing process, material database of parts and assemblies of aerospace manufacturing, equipment and technological modes of mechanical processing of materials, equipment and modes of obtaining permanent link of these materials by diffusion bonding.

В Сибирском государственном аэрокосмическом университете проводятся работы по автоматизации производственных процессов, включающие в том числе создание унифицированных баз данных для совершенствования технологии изготовления узлов аэрокосмического производства.

Теоретические основы и алгоритмы построения технологического процесса изготовления деталей и узлов аэрокосмической отрасли с применением различных способов соединения жаропрочных материалов, например диффузионной сваркой, проектируются на основании предлагаемого авторами запатентованного способа соединения «Способ соединения жаропрочного сплава на кобальтовой основе с керамикой на основе нитрида кремния» [1] и технологической оснастки «Установка для получения металлокерамических изделий» [2].

В патентах реализован способ получения соединения на примере определённого узла – ротора турбины турбонасосного агрегата, состоящего из определённых материалов – жаропрочного сплава на кобальтовой основе и керамики на основе нитрида кремния, содержащий определённые режимы получения металлокерамического узла диффузионной сваркой.

Выбор режимов и материалов в условиях производства затруднен, ввиду наличия обилия различных материалов и значительного разнообразия способов их соединения.

Задачей исследования является создание алгоритмов выбора режимов и материалов из созданной заранее базы данных как основы создания автоматизированной системы построения оптимальных технологических процессов соединения жаропрочных материалов, включающей как подбор совместимых материалов, так и выбор последовательности операций и режимов их осуществления.

Рассмотрим процесс адаптивного управления технологическим процессом в реальном масштабе времени.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма адаптивного управления автоматизированным оборудованием, составленным на основании условий генерации управляющей программы непосредственно в процессе обработки по результатам текущих данных в момент осуществления технологического процесса сварки.

В процессе функционирования создаётся база данных, содержащая характеристики оборудования, регулирующие параметры процесса диффузионной сварки. В блоке 1 вводится база данных области возможных вариаций исходных данных, определяющих структуру технологического процесса.

В процессе обработки отслеживаются построчным выделением текущие параметры процесса T, P, $\rho_В$, τ (блок 2). Их обработка выявляет четыре параметра, определяющих процесс диффузионной сварки (блок 3): $\rho_В$ – вакуум; T – температура сварки; P – давление при сварке; τ – время выдержки.

Дальнейшее преобразование безразмерных критериев выявляет массив данных (блок 4), который является основой для постоянного сравнения текущего значения критерия с учетом определенных для заданного процесса и свариваемых материалов значений по зависимостям разработанной технологии.

При соответствии производится выбор основных параметров из базы данных области возможных вариантов (вакуума, температуры сварки, давления при сварке, времени выдержки), удовлетворяющих условиям ввода (блок 7), при несоответствии производится проверка условий соответствия массива данным ввода (блок 5).

При несоблюдении условий производится операторская корректировка массива данных ввода (блок 6).

После выбора основных параметров производится проверка условий последней строки массива (блок 8).

При несоответствии производится сравнение значений основных параметров с данными из области возможных вариаций (блок 9), при соответствии проводится проверка условий соответствия массива данным ввода (блок 10). При несоблюдении этого условия производится оперативная корректировка массива данных ввода (блок 6).

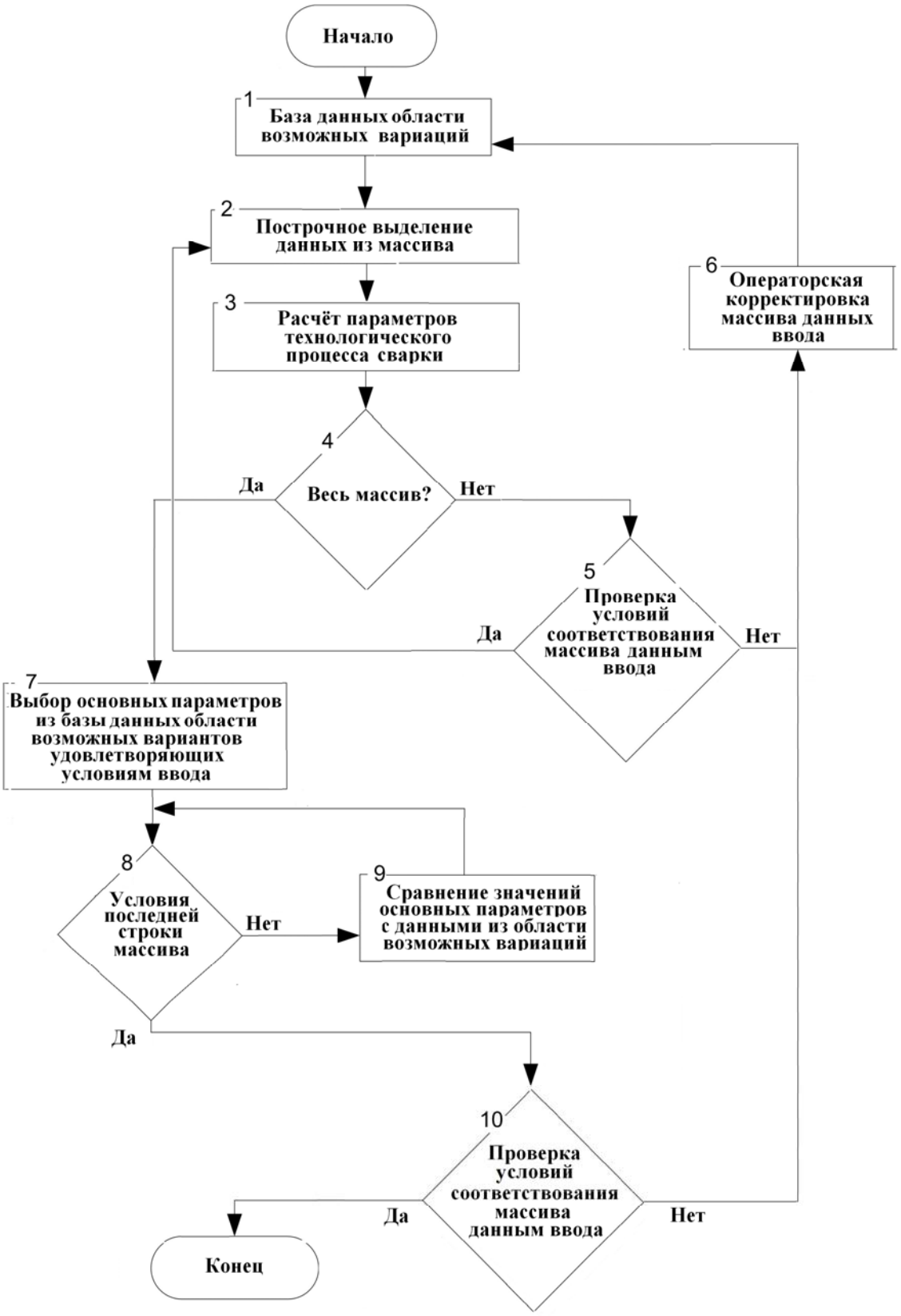


Рис. 1. Алгоритм адаптивного управления технологическим процессом диффузионной сварки

Таким образом, предусмотрено трехступенчатое управление технологическим оборудованием (блоки 5, 6, 10).

Оптимальные значения параметров технологического режима диффузионной сварки достигаются измерением ρ_B, T, P, τ последовательно, к изменению следующего параметра переходят лишь при полном исчерпании возможности рационализации процесса предыдущим параметром, выбор параметров адаптивного управления технологическим процессом диффузионной сварки моделируется как численная (аналитическая) модель оперативной задачи [1; 2].

Примером компьютерного проектирования и управления технологическими процессами изготовления деталей является создание технологии изготовления ротора турбины турбонасосного агрегата (рис. 2) [2–5].

Используя созданную базу данных материалов (рис. 3), применяемых в производстве узлов аэрокосмического производства [6], и учитывая тенденции применения новых конструкционных материалов, определяем материал диска ротора – керамика, вала – жаропрочный сплав на никелевой основе.

Керамический диск ротора спекаем на специализированном оборудовании.

Вал изготавливаем механической обработкой (рис. 4), используя базу данных металлорежущего оборудования [7]. По данной базе, в зависимости от размеров вала, выбираем металлорежущее оборудование, приспособление, режущий и измерительный инструмент, с помощью которых изготавливаем вал из жаропрочного сплава на никелевой основе.

После изготовления диска и вала проводим исследование базы данных получения неразъёмных соединений из заданных материалов диффузионной сваркой (рис. 5), с помощью которой выбираем сварочное оборудование и технологические режимы (текущие параметры ρ_B, T, P, τ) для получения неразъёмного металлокерамического соединения – ротора турбины турбонасосного агрегата, приведенного на рис. 2.

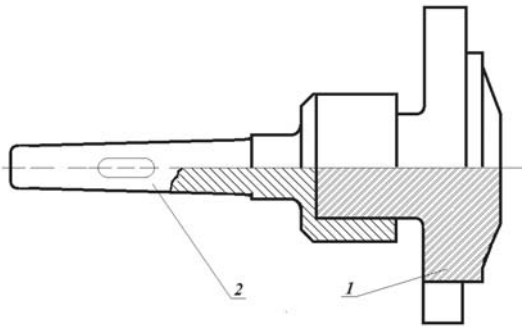


Рис. 2. Турбина турбонасосного агрегата:
1 – диск ротора, *2* – вал

Детали АКП

К	Материал	Деталь АКП	Категория	
1	Al	низкотемпературный (до 500 С) реактор	Алюминий	ЮЖМАШ – режим д
2	Al	оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)	Алюминий	ЮЖМАШ – режим д
3	Al	электромагнитный двигатель (ЭМД)	Алюминий	ЮЖМАШ – режим д
4	Al2O3	электромагнитный двигатель (ЭМД)	Алюминия оксид	ЮЖМАШ – режим д
5	Al2O3	электростатический двигатель (ЭСД)	Алюминия оксид	ЮЖМАШ – режим д
6	полисульфон	высокотемпературные солнечные энергетические установки (В	Аморфный полимер	ЮЖМАШ – режим д
7	Be	оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)	Берилий	ЮЖМАШ – режим д
8	Be	отражатель	Берилий	ЮЖМАШ – режим д
9	BeO	отражатель	Бери́ллия окси́д	ЮЖМАШ – режим д
10	BN	аккумуляторы	Бора нитрид АБН	ЮЖМАШ – режим д
11	BN	линейный Холловский двигатель	Бора нитрид АБН	ЮЖМАШ – режим д
12	BN	стационарный плазменный двигатель (СПД)	Бора нитрид АБН	ЮЖМАШ – режим д
13	BN	электронагревный двигатель (ЭНД)	Бора нитрид АБН	ЮЖМАШ – режим д
14	BN	электростатический двигатель (ЭСД)	Бора нитрид АБН	ЮЖМАШ – режим д
15	BN	электростатический двигатель (ЭСД)	Бора нитрид БГП	ЮЖМАШ – режим д
16	BN	аккумуляторы	Бора нитрид СБН	ЮЖМАШ – режим д
17	BN	линейный Холловский двигатель	Бора нитрид СБН	ЮЖМАШ – режим д
18	BN	плазменно-ионный двигатель (ПИД)	Бора нитрид СБН	ЮЖМАШ – режим д
19	BN	стационарный плазменный двигатель (СПД)	Бора нитрид СБН	ЮЖМАШ – режим д
20	BN	электродуговой двигатель (ЭДД)	Бора нитрид СБН	ЮЖМАШ – режим д
21	V	оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)	Вана́дий	ЮЖМАШ – режим д
22	W	высокотемпературные солнечные энергетические установки (В	Вольфрам	ЮЖМАШ – режим д
23	W	оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)	Вольфрам	ЮЖМАШ – режим д
24	W	электродуговой двигатель (ЭДД)	Вольфрам	ЮЖМАШ – режим д
25	W	электромагнитный двигатель (ЭМД)	Вольфрам	ЮЖМАШ – режим д
26	W	электронагревный двигатель (ЭНД)	Вольфрам	ЮЖМАШ – режим д
27	ВЖ172	корпуса деталей ГТД	Высокопрочный свариваемый сплав	ЮЖМАШ – режим д
28	GaAs	фотоэлектрические преобразователи (солнечный элемент) (ФЭ	Га́ллия арсени́д	ЮЖМАШ – режим д

Рис. 3. База данных материалов, применяемых для изготовления деталей и узлов аэрокосмического производства

Все таблицы

Поиск...

Оборудование

Оборудование : таблица

Режущий инструмент

Приспособление

Измерительный инструмент

Switchboard Items

Switchboard Items : таблица

Кнопочная форма

Оборудование

Технологич	Название станка	Модель	Наибольшая длина обр	Наибольший диаметр	Макси
Точить	Станок токарный патронно-це	16А20	900	320	

Опе	Названи	тип	вид обработки	ГОСТ	Обозн
010	Резец	токарный проходной упорный оснащенный	для обтачивания нежестких в	18879 - 73	2101-0
015	Резец	токарный проходной упорный оснащенный	для обтачивания нежестких в	18879 - 73	2101-0
025	Резец	токарный проходной отогнутый с пластинка	для обтачивания, подрезания	18877 - 73	2102-0
030	Резец	токарный проходной отогнутый с пластинка	для обтачивания, подрезания	18877 - 73	2102-0
040	Резец	токарный проходной упорный оснащенный	для обтачивания нежёстких в	18879-73	2101-0
045	Резец	токарный проходной упорный оснащенный	для обтачивания нежёстких в	18879-73	2101-0
060	Резец	токарный проходной упорный оснащенный	Для обтачивания нежёстких в	18879-73	2101-0

Название	ГОСТ	Вид	Щелкните
Штангенциркуль ШЦ-I	166-89	: Word 97-2003	

Название	ГОСТ	Вид	Щелкните
Штангенциркуль ШЦ-I	166-89	: Word 97-2003	

Рис. 4. База данных металлорежущего оборудования, режущего и измерительного инструмента, применяемого для изготовления деталей аэрокосмического производства

Режимы сварки

	Категория	Материал	Материал2	Прок	Толщ	Темпе	Врем	Свар	Ваку
91	Иттрий-годолиниевый феррит	40Cr-4	40Cr-4	Cu		950	20	20	0
92	Карбид бора	B4C	B4C			2150	45	8	
93	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК	У45	ПЖ2		1150	5	10	
94	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК	У8	ПЖ2		1150	5	10	
95	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК15	ВК15			1200	20	15,7	
96	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК20	18Х2Н4ВА	Ni		950	10	9,8	
97	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК20	18Х2Н4ВА	пермил		1050	10	9,8	
98	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК20	5ХГСВ	50Н	200	1130	12	5	
99	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК20	ВК20			1200	20	12,7	
###	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК20	Ст45	Cu		1050	10	9,8	
###	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК20М	5ХНМ	5ХНМ		1150	20	9	0
###	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК6	ВК6	Ni		1150	20	17,6	
###	Карбид вольфрама и кобальта твердый сплав	ВК8	ВК8	Ni		1150	20	15,7	
###	Керамика алюмооксидная	ГМ	Ti			1200	5	13,7	
###	Керамика вакуумплотная	ВК100-2	Pa			1300	20	18	0
###	Керамика вакуумплотная	ВК100-2	ВК100-2	Al		640	40	15	
###	Керамика вакуумплотная	ВК100-2	Нихром			1300	20	18	0
###	Керамика вакуумплотная	ВК100-2	Ст3			1300	20	18	0
###	Керамика вакуумплотная	ВК102	Х18Н10Т			1200	20	18	0
###	Керамика вакуумплотная	ВК94-1	ВК94-1	Cu		1030	120	20	
###	Керамика вакуумплотная	ВК94-1	ВК94-1	М-1		950	40	10	0
###	Керамика вакуумплотная	ВК94-1	ВК94-1	АД1		620	30	10	0,
###	Керамика вакуумплотная	ВК94-1	ВК94-1	АМг6		590	20	10	0,
###	Керамика вакуумплотная	ВК94-1	ВК94-1	29НК		1050	20	10	0
###	Керамика вакуумплотная	ВК94-1	Ковар			1200	20	18	0
###	Керамика вакуумплотная	ВК94-1	Х18Н10Т			1200	20	18	0
###	Керамика вакуумплотная	22ХС	Cu			1000	15	19,6	
###	Керамика вакуумплотная	22ХС	Ti			1000	10	11,7	
###	Керамика карбид кремния	SiC	Mo	Ni		800	10	39,2	

Тип установки	Способ нагрева	Усилие сжатия, кН	Размеры рабочей	Щелкните
МДС ОАО "ДЗНВА", г. Дивно	индукционный	13	100x10x10	

Рис. 5. База данных режимов технологических процессов и оборудования изготовления неразъёмных соединений диффузионной сваркой

Предлагаемый способ компьютерного проектирования и управления технологическими процессами изготовления деталей значительно упрощает организационные работы и сокращает время подготовки производства при изготовлении деталей и узлов аэрокосмического производства.

Библиографические ссылки

1. Пат. № 2433026 Российская Федерация, МПК B23B20/00. Способ соединения жаропрочного сплава на кобальтовой основе с керамикой на основе нитрида кремния / Пономарев С. И., Прокопьев С. В., Ереско С. П.,

Ереско Т. Т.; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Зарегистрирован 10.11.2011.

2. Пат. № 93722 Российская Федерация, МПК B23K20/26. Установка для получения металлокерамических изделий / Пономарев С. И., Ереско С. П., Ереско Т. Т.; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Зарегистрирован 10.05.2010.

3. Пономарев С. И., Ереско С. П. Получение газовых турбин диффузионной сваркой // XXXVII Академические чтения по космонавтике : материалы Российской академии наук. Секция 19 «Производство ракетно-космической техники». М. : РАН, 2013. С. 29–30.

4. Пономарев С. И., Ереско С. П., Ереско Т. Т. Методология экспериментальных исследований получения неразъемных металлокерамических узлов диффузионной сваркой // Механики XXI века : материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : сб. докладов. Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2013. С. 153–154.

5. Пономарев С. И., Ереско С. П. Построение модели технологического процесса диффузионной сварки // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. СибГАУ. Красноярск, 2011. Ч. 1 С. 247.

6. Атрибутивная база данных для создания технологических процессов получения деталей аэрокосмического производства диффузионной сваркой : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621572 Российской Федерации / С. И. Пономарёв, С. П. Ереско, Т. Т. Ереско; заявитель и правообладатель Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. № 2013621404 ; заявл. 31.10.13 ; дата гос. регистрации в Реестре баз данных 19.12.13.

7. Атрибутивная база данных технологического оборудования, инструмента и приспособлений для механической обработки деталей аэрокосмического производства : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620691 Российской Федерации / С. И. Пономарёв, Л. В. Ручкин, Н. Л. Ручкина; правообладатель Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т (RU). № 2014620376. Дата поступления 31.03.14 ; дата гос. регистрации в Реестре баз данных 15.05.14.

References

1. Ponomarev S. I., Prokop'ev S. V., Eresko S. P., Eresko T. T. *Sposob soedinenija zharoprochnogo splava na kobal'tovoj osnove s keramikoj na osnove nitrida kremnija* [Connection method superalloy cobalt based ceramics based on silicon nitride]. Patent RF, no. 2433026, 2011.

2. Ponomarev S. I., Eresko S. P., Eresko T. T. *Ustanovka dlja poluchenija metallokeramicheskih izdelij* [Aapparatus for manufacturing metal products]. Patent RF, no. 93722, 2010.

3. Ponomarev S. I., Eresko S. P. [Preparation of gas turbines by diffusion welding]. *Poluchenie gazovyh turbin diffuzionnoj svarkoj* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences “XXXVII Academic Readings on space”. Section 19 Production of rocket and space technology]. Moscow, 2013, p. 29–30. (In Russ).

4. Ponomarev S. I., Eresko S. P., Eresko T. T. [Experimental research methodology of obtaining permanent sintered nodes diffusion bonding technique]. *Metodologija jeksperimental'nyh issledovanij poluchenija nerazemnyh metallokeramicheskih uzlov diffuzionnoj svarkoj*. [Proceedings of the XII All-Russian scientific conference with international participation “Mechanics XXI Century”]. Bratsk, 2013, p. 153–154. (In Russ).

5. Ponomarev S. I., Eresko S. P. [Model building process of diffusion welding]. *Postroenie modeli tehnologicheskogo processa diffuzionnoj svarki*. [“Reshetnev reading materials” XV International Scientific Conference]. Krasnoyarsk. 2011. pp. 247. (In Russ).

6. Ponomarev S. I., Eresko S. P., Eresko T. T. *Atributivnaja baza dannyh dlja sozdanija tehnologicheskih processov poluchenija detalej ajerokosmicheskogo proizvodstva diffuzionnoj svarkoj* [Attributive database to create the technological processes of production of aerospace components by diffusion welding], Certificate RF, no. 2013621572, 2013.

7. Ponomarev S. I., Ruchkin L. V, Ruchkina N. L. *Atributivnaja baza dannyh tehnologicheskogo oborudovanija, instrumenta i prisposoblenij dlja mehanicheskoj obrabotki detalej ajerokosmicheskogo proizvodstva.* [Aattributive database processing equipment, tools and equipment for machining aerospace parts production]. Certificate RF, no. 2014620691, 2014.

© Пономарёв С. И., Ереско С. П., Ереско Т. Т., 2014

УДК 004.932

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 120–125

АВТОМАТИЧЕСКОЕ АННОТИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. В. Проскурин

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

Поиск изображений в сети Интернет и специализированных базах является актуальной задачей. Для такого поиска целесообразно применять системы автоматического аннотирования изображений на основе низкоуровневых характеристик. Проведен анализ существующих методов автоматического аннотирования изображений, а также алгоритмов автоматической сегментации. Приведены описания модели машинного перевода и алгоритма сегментации JSEG. Предложен набор визуальных признаков для описания областей изображений, включающий статистические признаки второго порядка и фрактальные признаки. Разработан алгоритм ААЛИ на основе модели машинного перевода. Предложенный алгоритм аннотирует с точностью до 88 % и применим для аннотирования изображений в специализированных базах и сети Интернет.

Ключевые слова: ландшафтные изображения, автоматическое аннотирование, алгоритм сегментации JSEG, текстурные признаки.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 120–125

AUTOMATIC LANDSCAPE IMAGE ANNOTATION

A. V. Proskurin

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

The image retrieval in the Internet and specialized datasets is the important task. For such retrieval is expedient to apply the systems of automatic image annotation (AIA) based on low-level features. Due to wide variety of images, it's sometimes useful to categorize images and to customize methods of AIA according these categories. In this article, the automatic landscape image annotation (ALIA) is discussed. Natural objects (rocks, clouds and etc.) on the landscape images often include just one texture. Because of that, for ALIA enough use of the machine translation model. In this model, the process of image annotation is analogous to the translation of one form of representation (image regions) to another form (keywords). Firstly, a segmentation algorithm is used to segment images into object-shaped regions. Then, cauterization is applied to the feature descriptors that are extracted from all the regions, to build visual words (clusters of visually similar image regions). Finally, a machine translation model is applied to build a translation table containing the probability estimations of the translation between image regions and keywords. An unseen image is annotated by choosing the most likely word for each of its regions. The ALIA algorithm was developed using machine translation model, wherein on the step of segmentation is applied algorithm of color-texture segmentation JSEG. Additionally, before segmentation the image is reduced in order to prevent appearance of small regions and to reduce computational cost, and after segmentation the resulting segmentation map is increased to the size of original image. The region descriptor including second-order statistical features and fractal features was proposed to describe the received segments. The extracted feature vectors are clustered using algorithm k-means. The proposed algorithm annotates the landscape images with 88 % precision and can be applied to annotate the images from specialized image datasets and the Internet.

Keywords: landscape images, automatic annotation, algorithm JSEG, texture features.

Введение. В последние два десятилетия развитие цифровых технологий привело к резкому росту количества изображений в сети Интернет. В связи с этим возникла необходимость в эффективной системе поиска. Существуют три подхода к поиску визуальной информации: составление текстовых аннотаций, анализ содержания, автоматическое аннотирование. В поисковых системах, основанных на первом подходе,

изображениям вручную присваиваются текстовые описания, после чего поиск осуществляется как с текстовыми документами. Использование текстовых запросов удобно для пользователей, однако аннотирование большого количества изображений вручную непрактично, а аннотации часто субъективны. Системы поиска изображений по содержанию лишены этих проблем – поиск производится на основе анализа и сравнения низкоуровневых признаков изображения, таких как цвет или текстура. Однако при этом наблюдается проблема семантического разрыва – отсутствие связи между низкоуровневыми признаками изображения и его интерпретацией человеком. Третий подход предполагает автоматическое аннотирование изображений (ААИ) на основе их низкоуровневых признаков и, таким образом, имеет преимущества двух первых подходов. В связи с большим разнообразием изображений иногда полезно выделять отдельные категории и в соответствии с ними настраивать методы ААИ. В данной статье рассматриваются вопросы автоматического аннотирования ландшафтных изображений (ААЛИ), которые являются широко распространенными объектами поиска.

За последние пятнадцать лет был предложен ряд подходов к автоматическому аннотированию изображений [1]. Большинство из них представляют аннотирование как процесс присоединения к цифровому изображению метаданных в виде ключевых слов. В контексте аннотирования ландшафтных изображений, в которых природные объекты (скалы, облака и др.) часто состоят из одной текстуры либо одна текстура занимает значительную их часть, достаточным является использование модели машинного перевода [2].

Модель машинного перевода. В модели машинного перевода процесс аннотирования рассматривается как перевод из одной формы представления (область изображения) в другую форму (ключевое слово). С этой целью используется таблица перевода. Для ее создания обучающие изображения, имеющие глобальные аннотации, предварительно сегментируются на области. Из областей, размер которых больше определенного порога, извлекаются векторы признаков, при этом с каждым вектором ассоциируется весь набор ключевых слов изображения. Все полученные векторы группируются в кластеры визуально похожих областей изображений, называемых визуальные слова. Сформированным визуальным словам c_j присваивается по одному ключевому слову w_i, вероятность принадлежности этому визуальному слову $P(w_i|c_j)$ которого наибольшая:

$$P\left(w_i \mid c_j\right) = \frac{m_{j,i}}{\sum_{k=1}^{W} m_{j,k}}, \qquad (1)$$

где $m_{j,i}$ – количество векторов признаков в визуальном слове c_j, помеченных ключевым словом w_i; W – количество всех ключевых слов, используемых для аннотирования изображений.

При аннотировании нового изображения оно также разбивается на сегменты, из которых извлекаются векторы признаков. После этого определяется принадлежность каждого вектора тому или иному визуальному слову. Векторам-запросам присваиваются ключевые слова, ассоциированные с визуальными словами, в которые они были определены. Таким образом, в модели машинного перевода каждой области изображения присваивается одно ключевое слово. Рассмотрим подробнее основные моменты этой модели: сегментацию изображения и извлечение низкоуровневых признаков областей.

Алгоритм сегментации JSEG. При решении задачи ААИ целесообразно применение следующих подходов к сегментации изображений [3]: разбиение на прямоугольные плитки; алгоритмы на основе свойств пикселов; методы выделения границ; алгоритмы, основанные на свойствах областей. При сегментировании ландшафтных изображений, в которых текстуры занимают значительную часть изображения, наиболее лучший результат показывают алгоритмы из последнего подхода. Среди них одним из перспективных является алгоритм JSEG, реализующий цвето-текстурную сегментацию [4]. Рассмотрим его работу подробнее.

На первом этапе алгоритма JSEG происходит квантование пикселов по цвету без значительного ухудшения качества изображения. После квантования пикселам назначаются метки, уникальные для каждого цвета. Новое созданное изображение меток называется картой классов. На ее основе строится так называемое J-изображение [4], в котором значения пикселов – это J-значения, вычисленные по локальным окнам, центрированным на этих пикселах. Рассмотрим метод вычисления J-значений.

Пусть Z – это набор N точек в карте классов, попавших в локальное окно, а $\mathbf{z} = (x, y)$ – отдельная точка в карте классов ($\mathbf{z} \in Z$). Тогда общая дисперсия координат точек карты классов S_T определяется следующей формулой:

$$S_T = \sum_{z \in Z} \left|\mathbf{z} - \mathbf{m}\right|^2, \qquad (2)$$

где $\mathbf{m}$ – среднее значение координат точек карты классов, попавших в локальное окно.

Предположим, что множество Z отображается в виде C классов Z_i, $i = 1, \ldots, C$. Обозначим сумму дисперсий координат отдельных классов как S_M. Зная общую дисперсию карты классов и сумму дисперсий классов, можно выразить J-значение:

$$J = (S_T - S_M)/S_T. \qquad (3)$$

Более низкое J-значение указывает на то, что пиксел находится внутри однородной области, более высокое значение – пиксел находится на границе областей. Таким образом, J-изображение можно представить в виде 3D-карты поверхности, которая хорошо сегментируется с помощью метода выращивания областей. Выращивание областей заключается в определении набора «семян», имеющих самые низкие локальные J-значения, к которым присоединяются близлежащие пикселы. Процесс сегментации

итеративен: вначале алгоритм сегментирует все изображение с использованием большого локального окна, после чего сегментация повторяется с меньшим масштабом для областей, полученных на предыдущем шаге. После выращивания областей излишне сегментированные области объединяют на основе схожести их цветов. Полученные сегменты в дальнейшем описываются с помощью низкоуровневых текстурных признаков.

Текстурные признаки. Ландшафтные изображения можно интерпретировать как совокупность текстурных фрагментов естественного происхождения. Текстура в широком смысле этого слова – это некоторым образом организованный локальный участок изображения, обладающий свойством однородности видеоданных. Известно три основных подхода к анализу текстур [5]: структурный, статистический и фрактальный. При описании ландшафтных текстур наиболее информативными являются статистические признаки второго порядка и фрактальные признаки. Рассмотрим их подробнее.

Для вычисления статистических признаков второго порядка используются матрицы смежности, элементы $p(i, j)$ которых содержат относительные частоты наличия на изображении двух соседних пикселов с яркостями $i, j \in G$, где $G = \{1, 2, \ldots, N_g\}$ – множество квантованных значений яркости от 1 до N_g. Обычно матрицы смежности вычисляют для горизонтального, вертикального и диагонального направлений. Хараликом было предложено 14 признаков [6], среди которых наиболее информативными являются:

– момент обратной разности – отражает степень разброса элементов матрицы смежности вокруг главной диагонали:

$$T_1 = \sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}\frac{p(i,j)}{1+(i-j)^2}; \quad (4)$$

– корреляция как мера линейности регрессионной зависимости яркости на изображении – вычисляется по следующей формуле:

$$T_2 = \sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}\frac{(i-\mu_x)\cdot(j-\mu_y)\cdot p(i,j)}{\sigma_x\cdot\sigma_y}, \quad (5)$$

где μ_x, μ_y, σ_x, σ_y – средние значения и среднеквадратичные отклонения элементов матрицы смежности по строкам и столбцам соответственно;

– энтропия – выражает неравномерность распределения яркостных свойств элементов изображения:

$$T_3 = -\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g} p(i,j)\cdot\log\left(p(i,j)\right); \quad (6)$$

– информационная мера корреляции – рассчитывается как

$$T_4 = \sqrt{1-e^{-2\cdot(HXY-T_3)}}, \quad (7)$$

$$HXY = -\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g} p_x(i)\cdot p_y(j)\cdot\log\left(p_x(i)\cdot p_y(j)\right), \quad (8)$$

где $p_x(i)$, $p_y(j)$ – сумма значений элементов матрицы смежности по строке i и столбцу j соответственно;

– однородность – определяется по формуле

$$T_5 = \sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g}\frac{p(i,j)}{1+|i-j|}. \quad (9)$$

В результате пять статистических признаков (T_1, …, T_5) используются как RD_1, …, RD_5 элементы вектора признаков, описывающих области.

Для определения естественных текстур также часто используют измерение фрактальной размерности D, являющейся уникальной характеристикой природных объектов. Для вычисления фрактальной размерности обычно используется метод покрытия кубами [7]. Представим связную область A на множестве R^n. Предположим, что область A можно покрыть n-мерным кубом размером $L_{\max}$. Если область A является уменьшенной копией с коэффициентом r, то существует $N = r^{-D}$ подобластей. Поэтому число кубов размером $L = rL_{\max}$, необходимых для покрытия всей области, задается выражением:

$$N(L) = 1/r^D = [L_{\max}/L]^D. \quad (10)$$

Простым способом определения величины D из соотношения (10) является покрытие пространства размерностью n сеткой из кубов с длиной стороны L и подсчет количества непустых кубов K. Вычисление параметра $N(L)$ для нескольких значений L позволяет определить размерность D по наклону линии, проходящей через последовательность заполненных ячеек наименьшего размера, расположенных вдоль линии $\{\log L; -\log N(L)\}$.

Однако существует ряд фракталов, имеющих схожие фрактальные размерности, но резко отличающиеся текстуры. Для их описания дополнительно рассчитывается лакунарность (заполнение), которую можно описать следующей формулой:

$$\lambda = (\sigma/\mu)^2, \quad (11)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение значений пикселов изображения фрактала; μ – среднее значение пикселов изображения фрактала.

Заполнение мало для плотной текстуры и велико, когда текстура зернистая, что позволяет определить разнородность фрактальных образований. Таким образом, фрактальные признаки D и λ используются как RD_6 и RD_7 элементы вектора признаков, описывающих области. Сформированный вектор признаков **RD** = $\{RD_1, \ldots, RD_7\}$ извлекается из всех областей, полученных после сегментации изображений. Перед дальнейшим их использованием все значения элементов предварительно приводятся к диапазону изменения значений [0; 1].

Алгоритм автоматического аннотирования ландшафтных изображений. На основе модели машинного перевода был разработан метод автоматического

аннотирования ландшафтных изображений. В этом методе основным является алгоритм заполнения таблицы перевода (рис. 1). Рассмотрим его подробнее.

Алгоритм заполнения таблицы перевода выполняется для набора цветных изображений, каждое из которых заранее описано с помощью нескольких ключевых слов. На первом этапе осуществляется предобработка изображений с целью удаления шумов и выравнивания освещенности (рис. 1, блок 2). Для этого применяется фильтр Гаусса [8] и алгоритм «Серый мир» [8] соответственно.

Полученные изображения переводятся в оттенки серого (рис. 1, блок 3), а также используются для формирования карт сегментации, в которых пикселам отдельных сегментов присваиваются разные метки (рис. 1, блоки 4–6). Для этого изображения после предобработки уменьшаются до размеров 320×240 пикселов с целью предотвращения появления небольших областей и уменьшения вычислительных затрат. После этого осуществляется сегментация с помощью алгоритма JSEG [4]. Полученные карты сегментации для уменьшенных изображений приводятся к размеру оригинальных изображений. На следующем шаге карты сегментации накладываются на изображения в оттенках серого (рис. 1, блок 7).

После формирования набора сегментов в оттенках серого из каждого сегмента извлекается вектор признаков **RD** (рис. 1, блок 8). При этом с каждым вектором ассоциируется весь набор ключевых слов, принадлежавших исходному изображению. Извлеченные векторы признаков затем кластеризуются с помощью алгоритма *k*-средних (рис. 1, блок 9). Для сформированных кластеров вычисляются условные вероятности принадлежности им ключевых слов по формуле (1). Ключевые слова с наибольшей вероятностью и центры кластеров (эталоны) заносятся в таблицу перевода (рис. 1, блок 10).

Для аннотирования новых изображений на основе созданной таблицы перевода используется алгоритм, представленный на рис. 1, за исключением блоков кластеризации признаков и заполнения таблицы перевода. Вместо них происходит сравнение извлеченных векторов с сохраненными в таблице эталонами с помощью косинусной метрики. Вектор-запросу присваивается ключевое слово наиболее близкого вектор-эталона. Далее изображение аннотируется ключевыми словами своих вектор-признаков.

Экспериментальные результаты. Для обучения таблицы перевода, а также тестирования алгоритма аннотирования изображений было сформировано 10 тематических наборов ландшафтных изображений (горы, облака, вода и т. д.), содержащих от 50 до 150 изображений (общее количество изображений – 1030), при этом 60 % изображений (620 штук) было включено в обучающую выборку, а остальные (410 штук) – в тестовую. Тематические наборы были составлены выбором ландшафтных изображений из специализированной базы тестовых изображений IAPR TC-12 Benchmark [9]. Пример использованных изображений представлен на рис. 2. В результате ААЛИ могут быть найдены верные ключевые слова (подчеркнутые слова на рис. 2) и ошибочно присвоенные слова.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма заполнения таблицы перевода

лед, горы, трава, вода, снег, камни

облака, вода, деревья, небо, песок

небо, горы, снег, песок, скалы

лес, облака

облака, трава, небо, песок

небо, лес, песок, снег, вода

Рис. 2. Примеры тестовых изображений и их автоматического аннотирования

Точность описания изображений Precision определялась с помощью формулы

$$\text{Precision} = \frac{1}{C} \cdot \sum_{i=1}^{C} \frac{B_i}{A_i}, \qquad (12)$$

где C – количество изображений в наборе; A_i – общее количество автоматически присвоенных изображению i ключевых слов; B_i – количество правильно присвоенных изображению i ключевых слов.

Результаты представлены на рис. 3.

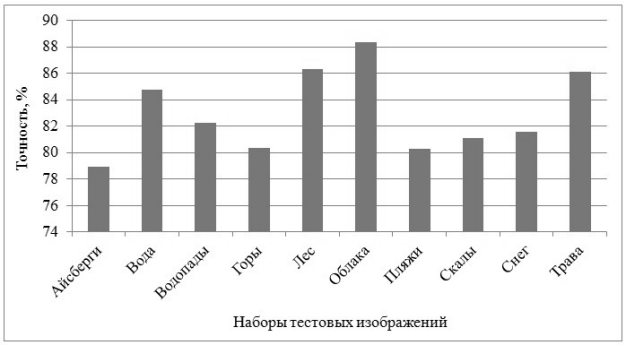


Рис. 3. Диаграмма, отображающая точность автоматического аннотирования

Из представленной диаграммы видно, что процент правильно присвоенных ключевых слов изменяется от 78,9 до 88,3 % в зависимости от преобладающей текстуры на изображении. Относительно низкий процент для гор и скал можно объяснить большим разнообразием текстур, обозначаемых одним и тем же ключевым словом. Также было замечено, что довольно часто происходит аннотирование песка ключевыми словами «снег» и «лед» и наоборот. Это связано с тем, что при определенном масштабе текстуры песка и снега имеют близкие характеристики. Избежать подобных ошибок можно, добавив в вектор признаков цветовые характеристики сегментов.

Для тестирования быстродействия работы алгоритмов было создано 4 набора по 100 изображений, имеющих различные варианты разрешения. Тестирование быстродействия системы производилось для двух алгоритмов системы: алгоритма предварительной обработки и сегментации изображения, алгоритма извлечения признаков и аннотирования изображения (рис. 4). Использовалась системная плата Acer JM50-HR; процессор Intel Core i5-2430M 2,4 ГГц; память (ОЗУ) Kingston 1333 МГц (PC3-10700) DDR3 4 ГБ; видеокарта NVIDIA GeForce GT 540M 1 ГБ; основной жесткий диск Seagate 5400 rpm 500 ГБ. Вычисления производились с использованием одного процессорного ядра.

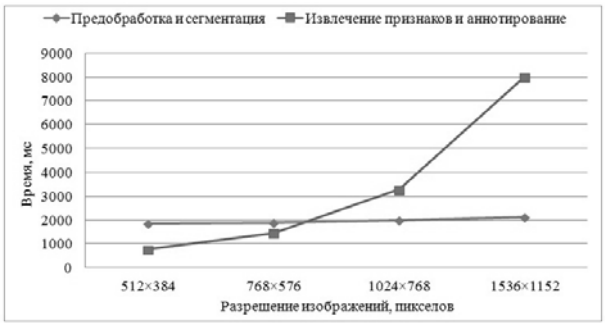


Рис. 4. График зависимости времени выполнения алгоритмов от разрешения изображения

Из графика видно, что время, затрачиваемое на предварительную обработку и сегментацию, возрастает практически линейно с увеличением разрешения изображений. Это связанно с тем, что предварительная обработка в большей степени имеет линейную зависимость, а сегментация выполняется для изображения уменьшенного до одного и того же разрешения (320×240 пикселов). Экспоненциальный рост затрачиваемого времени на извлечение признаков и аннотирование изображения обусловлено особенностью вычисления статистических признаков, требующих большого количества проходов по изображению.

Заключение. В статье представлены результаты исследований автоматического аннотирования ландшафтных изображений. Был применен метод машинного перевода, в котором на этапе сегментации используется алгоритм цветотекстурной сегментации JSEG. Для описания ландшафтных изображений предложен набор текстурных признаков, включающий статистические признаки второго порядка и фрактальные признаки. Разработанный алгоритм позволяет автоматически аннотировать ландшафтные изображения с достоверностью от 78,9 до 88,3 %. Он может быть использован для аннотирования специализированных баз ландшафтных изображений и изображений в сети Интернет. Для повышения точности аннотирования планируется расширение вектора признаков, описывающих текстурные фрагменты, а также применение адаптивных методов кластеризации.

Библиографические ссылки

1. Zhang D., Islam Md. M., Lu G. A review on automatic image annotation techniques // Pattern Recognition. 2012. Vol. 45(1). P. 346–362.

2. Duygulu P., Barnard K., Freitas N., Forsyth D. Object recognition as machine translation // In The Seventh European Conference on Computer Vision. Part IV. 2002. P. 97–112.

3. Dey V., Zhang Y., Zhong M. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective // Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Symposium (ISPRS10). Vol. XXXVIII, Part 7A. 2010. P. 31–42.

4. Deng Y., Manjunath B. S. Unsupervised Segmentation of Color-Texture Regions in Images and Video // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2001. Vol. 23(8). P 800–810.

5. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений : учеб. пособие. СПб. : Изд-во ИТМО, 2008. 195 с.

6. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. H. Textural Features for Image Classification // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 1973. Vol. 3(6). P. 610–621.

7. Favorskaya M. N., Petukhov N. Y. Recognition of natural objects on air photographs using neural networks // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2011. Vol. 47(3). P. 233–238.

8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Изд. дом «Техносфера», 2008. 1072 с.

9. IAPR TC-12 Benchmark [Электронный ресурс]. URL: http://www-i6.informatik.rwth-aachen.de/imageclef/resources/iaprtc12.tgz (дата обращения: 20.11.2013).

References

1. Zhang D., Islam Md. M., Lu G. A review on automatic image annotation techniques. *Pattern Recognition*. 2012. Vol. 45(1). P. 346–362.

2. Duygulu P., Barnard K., Freitas N., Forsyth D. Object recognition as machine translation. *In The Seventh European Conference on Computer Vision*. Part IV, 2002, p. 97–112.

3. Dey V., Zhang Y., Zhong M. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective. *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Symposium (ISPRS10)*. Vol. XXXVIII, Part 7A, 2010, p. 31–42.

4. Deng Y., Manjunath B. S. Unsupervised Segmentation of Color-Texture Regions in Images and Video. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2001, Vol. 23(8), p. 800–810.

5. Fisenko V. T., Fisenko T. Yu. *Komp'yuternaya obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy* [Computer image processing and recognition]. St. Petersburg, ITMO Publ., 2008, p. 195.

6. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. H. Textural Features for Image Classification. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. 1973, Vol. 3(6), p. 610–621.

7. Favorskaya M. N., Petukhov N. Y. Recognition of natural objects on air photographs using neural networks. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2011, Vol. 47(3), p. 233–238.

8. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital image processing (3rd edition). *Prentice-Hall*, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006, p. 976.

9. IAPR TC-12 Benchmark. Available at: http://www-i6.informatik.rwth-aachen.de/imageclef/ resources/iaprtc12.tgz (accessed 20.11.2013).

© Проскурин А. В., 2014

УДК 517.55

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 126–130

РАЗРЕШИМОСТЬ РАЗНОСТНОЙ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЯВНЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ

М. С. Рогозина

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

Дискретизация дифференциальной задачи приводит к разностным уравнениям, и в случае неявных разностных схем вопрос о разрешимости является нетривиальным. Так как задача сводится к разрешимости систем линейных уравнений, то в работе используются методы линейной алгебры. Даны необходимые и достаточные условия разрешимости и простое достаточное условие через коэффициенты полиномиального разностного оператора. Указана связь этих результатов с методом прогонки для систем алгебраических уравнений с ленточными матрицами. Результаты могут быть использованы как для исследования устойчивости разностных схем, так и для построения мономиальных базисов факторов в кольце полиномов.

Ключевые слова: полиномиальный разностный оператор, задача Коши.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 126–130

SOLVABILITY OF A DIFFERENCE CAUCHY PROBLEM FOR MULTI-LAYER IMPLICIT DIFFERENCE SCHEMES

M. S. Rogozina

Siberian Federal University
79, Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: rogozina.marina@mail.ru

Difference equations arise in different areas of mathematics. Difference equations in conjunction with a method of generation functions give a efficient technique for studying the enumerative problems in the combinatorial analyses. Another source of difference equations is discretization of differential equations. Methods of discretization a differential equation is an important part of the theory of difference schemes, and also lead to difference equations [1]. In the case of implicit difference schemes its solvability presents a non-trivial question. In [2] investigated the stability of a two-layer homogeneous linear difference scheme with constant coefficients. In [3] to study the stability of multilayer homogeneous difference schemes applied theory of amoebas of algebraic hypersurfaces and a formula for the solution of the Cauchy problem in terms of its fundamental solution. In [4] for the two-dimensional case is investigated difference analog of the boundary value problem for Hormander polynomial differential operator. We investigate the solvability of difference equations with initial-boundary conditions of Riquier and consider them as implicit multi-layer difference schemes. Since this question reduces to solvability of systems of linear equations, we use linear algebra to give necessary and sufficient conditions and a simple sufficient condition for solvability in terms of coefficients of a polynomial difference operator. We show the relation of these results to the elimination algorithm for systems of algebraic equations with band matrices. The results can be applied for studying solvability of difference schemes and construction of monomial bases in quotients of the polynomial ring.

Keywords: polynomial difference operator, Cauchy problem.

Введение. Разностные уравнения возникают в различных областях математики. В комбинаторном анализе разностные уравнения в сочетании с методом производящих функций дают мощный аппарат исследования перечислительных задач. Другой источник появления разностных уравнений – дискретизация дифференциальных. Методы дискретизации дифференциальной задачи являются важной составной частью теории разностных схем и также приводят к разностным уравнениям [1].

В монографии [2] исследована устойчивость однородной двухслойной линейной разностной схемы

с постоянными коэффициентами. В работе [3] к исследованию устойчивости многослойных однородных разностных схем применяется теория амеб алгебраических гиперповерхностей и получена формула для решения задачи Коши через ее фундаментальное решение.

В [4] для двумерного случая исследован разностный аналог краевой задачи Хермандера для полиномиального дифференциального оператора. В данной работе исследуется разрешимость разностных уравнений с начально-краевыми условиями типа Рикье. С точки зрения теории разностных схем это многослойные неявные разностные схемы. Дан критерий (теорема 2) разрешимости и простое достаточное условие (теорема 1). В теореме 3 отражена связь полученных результатов с известным методом исследования разностных схем – методом прогонки для систем линейных уравнений с ленточными матрицами (см., например, [5]).

Введем необходимые обозначения и определения.

$\mathbb{Z}^2$ – целочисленная решетка и $\mathbb{Z}_+$ – подмножество этой решетки, состоящее из точек с целыми неотрицательными координатами. Пусть δ_1 – оператор сдвига по переменной x, т. е. $\delta_1 f(x,y) = f(x+1,y)$, а δ_2 – оператор сдвига по переменной y, т. е. $\delta_2 f(x,y) = f(x,y+1)$. Зададим «полосу» $\Pi = \{(x, y) \in \mathbb{Z}_+^2,\ 0 \le x \le B,\ y > 0\}$ в положительном октанте целочисленной решетки, число $B+1$ будем называть шириной «полосы» Π. Рассмотрим разностный полиномиальный оператор с постоянными коэффициентами вида

$$P(\delta_1,\delta_2) = \sum_{j=0}^{m}\sum_{i=0}^{b} c_{ij}\delta_1^i\delta_2^j = \sum_{j=0}^{m} P_j(\delta_1)\delta_2^j, \qquad (1)$$

где $P_j(\delta_1) = \sum_{i=0}^{b} c_{ij}\delta_1^i,\ \ j = 0, 1, \ldots, m.$

Многочлен $P(z,w) = \sum_{j=0}^{m}\sum_{i=0}^{b} c_{ij} z^i w^j$ называется характеристическим. Степень m многочлена $P(z,w)$ будем называть порядком разностного оператора $P(\delta_1,\delta_2)$ и предполагать, что $b < B$.

Зафиксируем β такое, что $c_{\beta m} \ne 0$, и рассмотрим множество $\Pi_\beta = \{(x,y) \in \mathbb{Z}_+^2:\ 0 \le x - \beta \le B-b,\ y > m - 1\}$. Обозначим $L_\beta = \Pi\backslash\Pi_\beta$ и сформулируем следующую задачу:

найти решение разностного уравнения

$$P(\delta_1,\delta_2)f(x,y) = g(x,y),\ (x,y) \in \Pi, \qquad (2)$$

удовлетворяющее условию

$$f(x,y) = \varphi(x,y),\ (x,y) \in L_\beta, \qquad (3)$$

где $g(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ – заданные функции целочисленных аргументов.

Задачу (2)–(3) назовем задачей Коши для полиномиального разностного оператора (1) и приведем легко проверяемое условие ее разрешимости.

Теорема 1. Если для коэффициентов полиномиального разностного оператора $P(\delta_1,\delta_2)$ выполнено условие

$$\left|c_{\beta m}\right| \ge \sum_{\substack{|\alpha|=0,\\ \alpha\ne\beta}}^{b} \left|c_{\alpha m}\right|, \qquad (4)$$

то задача (2)–(3) имеет единственное решение.

Система уравнений (2)–(3) представляет собой бесконечную систему уравнений относительно переменных $f(x,y)$, $(x,y) \in \Pi$. Важной особенностью этой системы является то, что каждое уравнение в ней зависит от конечного числа неизвестных. Известно (см. [6, лемма 6.3.7]), что такая система совместна тогда и только тогда, когда любая система из конечного числа этих уравнений совместна. Для исследования вопроса об условиях на оператор $P(\delta_1,\delta_2)$, при выполнении которых задача (2)–(3) разрешима, прежде всего упорядочим уравнения этой системы так, чтобы число неизвестных в каждом следующем уравнении было больше или равно числу неизвестных в предыдущем.

Зафиксируем p такое, что $p \ge m$, и будем рассматривать прямоугольник $\Pi^p = \{(x,y):0 \le x \le B,\ 0 \le y \le p\}$. Неизвестные будем нумеровать элементами множества Π^p и упорядочим это множество лексикографически. Уравнения будем нумеровать элементами двух множеств $\Pi^p_\beta = \{(x,y):\ 0 \le x \le B - b,\ 0 \le y \le p - m\}$ и $L^p_\beta = \Pi^p\backslash\{(\beta,m) + \Pi^p_\beta\}$. Так как $L^p_\beta \cup \{(\beta,m)+\Pi^p_\beta\} = \Pi^p$, то элементам множества L^p_β присвоим те же «номера», с которыми они входят в множество Π^p, а элементам (x,y) множества Π^p_β – те «номера», с которыми $(\beta,m) + (x,y)$ входят в Π^p.

Получим систему уравнений относительно неизвестных $f(x,y)$, $(x,y) \in \Pi^p$ вида

$$P(\delta_1,\delta_2)f(x,y) = g(x,y),\ (x,y) \in \Pi^p_\beta, \qquad (5)$$

$$f(x,y) = \varphi(x,y),\ (x,y) \in L^p_\beta. \qquad (6)$$

Число уравнений $\#(L^p_\beta \sqcup \Pi^p_\beta)$ этой системы равно числу неизвестных $\#\Pi^p$. Символ «$\sqcup$» означает дизъюнктное объединение.

Пример 1. Рассмотрим разностный оператор $P(\delta_1,\delta_2) = c_{21}\delta_1^2\delta_2 + c_{11}\delta_1\delta_2 + c_{01}\delta_2 + c_{20}\delta_1^2 + c_{10}\delta_1 + c_{00}$, где $m = 1$, $\beta = 1$, $b = 2$. Пусть $B = 3$, $p = 2$, тогда система уравнений (5)–(6) примет вид

$$c_{21}f(x+2,y+1) + c_{11}f(x+1,y+1) + c_{01}f(x,y+1) + c_{20}f(x+2,y) +$$

$$+c_{10}f(x+1,y) + c_{00}f(x,y) = g(x,y),\ (x,y) \in \Pi^2_1, \qquad (5a)$$

$$f(x,y) = \varphi(x,y),\ (x,y) \in L^2_1, \qquad (6a)$$

относительно неизвестных $f(y_1,y_2)$, $(y_1,y_2) \in \Pi^2 = \{(0,0), (1,0), (2,0), (3,0), (0,1), (1,1), (2,1), (3,1), (0,2), (1,2), (2,2), (3,2)\}$. Уравнения (5а) нумеруются элементами множества $\Pi^2_1=\left\{\left(\bar{0},\bar{0}\right), \left(\bar{1},\bar{0}\right), \left(\bar{0},\bar{1}\right), \left(\bar{1},\bar{1}\right)\right\}$, а уравнения (6а) – элементами множества $L^2_1=\{(0,0), (1,0), (2,0), (3,0), (0,1)\ (3,1), (0,2), (3,2)\}$. Так как объединение $L^p_\beta \sqcup \Pi^p_\beta$ дизъюнктное, то точки с координатами (x,y) и $\left(\bar{x},\bar{y}\right)$ считаются различными.

Возвращаясь к общему случаю, обозначим $\Delta_{p,\beta}$ определитель системы уравнений (5)–(6). Его порядок равен $N = (B+1)\cdot(p+1)$ и состоит он из строк двух видов. В строках, соответствующих уравнениям (6), все элементы, кроме одного (равного 1), равны 0. Строки, соответствующие уравнениям (5), состоят из нулей и коэффициентов c_{ij} разностного оператора $P(\delta_1,\delta_2)$.

Пример 2. Для разностного оператора $P(\delta_1,\delta_2)$, рассмотренного в примере 1, имеем

$$\Delta_{2,1}=\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{00} & c_{10} & c_{20} & 0 & c_{01} & c_{11} & c_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{00} & c_{10} & c_{20} & 0 & c_{01} & c_{11} & c_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{00} & c_{10} & c_{20} & 0 & c_{01} & c_{11} & c_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{00} & c_{10} & c_{20} & 0 & c_{01} & c_{11} & c_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Теорема 2. Задача (2)–(3) для всех $\varphi(x,y)$ и $g(x,y)$ имеет единственное решение тогда и только тогда, когда для всех $p \geq m$ определители $\Delta_{p,\beta} \neq 0$.

В определителях $\Delta_{p,\beta}$, отвечающих за разрешимость задачи Коши, присутствуют все коэффициенты c_{ij} характеристического многочлена $P(z,w)$. Оказалось, что разрешимость задачи (2)–(3) зависит в действительности только от коэффициентов многочлена $P_m(z)=\sum_{i=0}^{b} c_{im} z^i$.

Обозначим $\widetilde{\Pi}^q = \{(x,y)\colon 0 \leq x \leq B,\ y = q\}$, $\widetilde{\Pi}^q_\beta = \{(x,y)\colon 0 \leq x-\beta \leq B-b,\ y = q\}$, $\widetilde{L}^q_\beta = \widetilde{\Pi}^q \setminus \widetilde{\Pi}^q_\beta$. Нетрудно видеть, что $\#\widetilde{\Pi}^q_\beta + \#\widetilde{L}^q_\beta = \#\widetilde{\Pi}^q$.

Для $q = 0, 1, \ldots, p$ обозначим $D_{q,\beta}$ миноры определителя $\Delta_{p,\beta}$, составленные из его строк, соответствующих уравнениям

$$P(\delta_1, \delta_2)f(x, y) = g(x, y),\ (x, y) \in \widetilde{\Pi}^q_\beta, \qquad (7)$$

$$f(x, y) = \varphi(x, y),\ (x, y) \in \widetilde{L}^q_\beta, \qquad (8)$$

и столбцов, соответствующих неизвестным $f(x,y)$, где $(x,y) \in \widetilde{\Pi}^q$.

Отметим, что в определителях $D_{q,\beta}$ присутствуют только коэффициенты многочлена $P_m(z)=\sum_{i=0}^{b} c_{im} z^i$, и порядок всех определителей $D_{q,\beta}$ равен $B+1$, т. е. ширине полосы.

Пример 3. Для разностного оператора $P(\delta_1,\delta_2)$, рассмотренного в примерах 1, 2, для $q = 0, 1, 2$ имеем

$$D_{0,1}=\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, D_{1,1} = D_{2,1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ c_{01} & c_{11} & c_{21} & 0 \\ 0 & c_{01} & c_{11} & c_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Связь между определителями $\Delta_{p,\beta}$ и $D_{p,\beta}$ дается следующей леммой.

Лемма. Для всякого p справедливо равенство $\Delta_{p,\beta} = D^{p-m+1}_{m,\beta}$.

Доказательство. Будем последовательно преобразовывать определитель $\Delta_{p,\beta}$, пользуясь теоремой Лапласа (см., например, [7]).

На первом шаге ($q = 0$) разложим определитель по строкам с «номерами» $(x,y) \in \widetilde{\Pi}^0_\beta$ и $(x,y) \in \widetilde{L}^0_\beta$. Таких строк будет $B+1$, и в них ненулевым (равным 1) является один элемент, который стоит на главной диагонали $D_{0,\beta} = 1$.

Определитель, полученный из $\Delta_{p,\beta}$ вычеркиванием этих строк и столбцов, соответствующих неизвестным $f(0,0), f(1,0), f(2,0), \ldots, f(B,0)$, обозначим $\Delta^1_{p,\beta}$. Очевидно, что $\Delta_{p,\beta} = D_{0,\beta}\cdot\Delta^1_{p,\beta}$.

На втором шаге ($q = 1$) разложим определитель $\Delta^1_{p,\beta}$ по строкам с «номерами» из множеств $\widetilde{\Pi}^1_\beta$ и $\widetilde{L}^1_\beta$. Среди миноров порядка $B+1$ не содержит нулевой строки только определитель, составленный из столбцов с «номерами» $(x,y) \in \widetilde{\Pi}^1$, т. е. минор $D_{1,\beta}$, поэтому $\Delta^1_{p,\beta} = D_{1,\beta}\cdot\Delta^2_{p,\beta}$, где определитель $\Delta^2_{p,\beta}$ получен из определителя $\Delta^1_{p,\beta}$ вычеркиванием строк с «номерами» $(x,y) \in \widetilde{\Pi}^1_\beta$ и $(x,y) \in \widetilde{L}^1_\beta$ и столбцов с «номерами» $(x,y) \in \widetilde{\Pi}^1$.

Продолжая процедуру, на $(q+1)$-м шаге среди миноров порядка $B+1$ определителя $\Delta^{q-1}_{p,\beta}$, соответствующих строкам с «номерами» из множеств $\widetilde{\Pi}^q_\beta$ и $\widetilde{L}^q_\beta$, не содержит нулевой строки только определитель, составленный из столбцов с «номерами» $(x, y) \in \widetilde{\Pi}^q$, т. е. $D_{q,\beta}$. Таким образом, $\Delta^q_{p,\beta} = D_{q,\beta}\cdot\Delta^{(q+1)}_{p,\beta}$.

Так как на последнем p-м шаге $\Delta^p_{p,\beta} = D_{p,\beta}$, то $\Delta_{p,\beta} = D_{0,\beta}\cdot D_{1,\beta} \cdots D_{p,\beta}$. Поскольку $D_{0,\beta} = \ldots = D_{m-1,\beta} = 1$, а $D_{m,\beta} = D_{m+1,\beta} = \ldots = D_{p,\beta}$, то $\Delta_{p,\beta} = D^{p-m+1}_{m,\beta}$.

Пример 4. Для разностного оператора $P(\delta_1,\delta_2)$, рассмотренного в примерах 1–3, в соответствии с леммой имеем $\Delta_{2,1} = D_{0,1}\cdot D_{1,1}\cdot D_{2,1} = D^2_{1,1} = (c_{11}\cdot c_{11}-c_{01}\cdot c_{21})^2$.

Доказательство теоремы 2. Пусть для всех $p \geq m$ определитель $\Delta_{p,\beta} \neq 0$. Докажем, что при любом выборе $\varphi(x,y)$ и $g(x,y)$ задача (5)–(6) имеет единственное решение. Доказательство состоит в последовательном решении систем линейных уравнений относительно неизвестных $f(x,y)$. Определителем этой системы является $\Delta_{p,\beta} \neq 0$.

На первом шаге берем $p = m$. Точки с координатами (0,0), (1,0), ..., $(B-b,0)$ подставляем в уравнение (5), а точки с координатами $(x,y) \in L^m_\beta$ – в уравнение (6).

Получим систему уравнений с ленточной матрицей, определитель (порядка $(m+1)\cdot(B+1)$) которой имеет вид

$$\Delta_{m,\beta}=\begin{vmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & c_{\beta-1m} & c_{\beta m} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & c_{\beta m} & c_{\beta+1m} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Очевидным условием разрешимости этой системы является $\Delta_{m,\beta} \neq 0$.

На втором шаге берем $p = m + 1$. Точки с координатами (0,0), (1,0), ..., $(B–b,0)$, (0,1), (1,1), ..., $(B–b,1)$ подставляем в уравнение (5), а точки с координатами $(x,y) \in L^{m+1}{}_{\beta}$ – в уравнение (6). Получим систему уравнений с определителем $\Delta_{m+1,\beta}$ порядка $(m+2)\cdot(B+1)$. Очевидным условием разрешимости системы является $\Delta_{m+1,\beta} \neq 0$.

Продолжая процесс, на $(p+1)$-м шаге подставим в уравнение (5) точки с координатами (0,0), (1,0), ..., $(B–b,0)$, ..., $(0,p–m)$, $(1,p–m)$, ..., $(B–b,p–m)$, а точки с координатами $(x,y) \in L^{p}{}_{\beta}$ – в уравнение (6). Получим систему уравнений с определителем $\Delta_{p,\beta}$ порядка $(p+1)\cdot(B+1)$. Очевидным условием разрешимости системы является $\Delta_{p,\beta} \neq 0$.

Таким образом, условие «для всех $p \le m$ определители $\Delta_{p,\beta} \neq 0$» обеспечивает существование и единственность решения задачи (2)–(3) при произвольном выборе правой части $g(x,y)$ и начальных данных $\varphi(x,y)$.

Покажем справедливость обратного утверждения.

Возьмем $g(x,y) \equiv 0$, $\varphi(x,y) \equiv 0$. По условию единственным решением может быть только тождественный нуль: $f(x,y) \equiv 0$ для $(x,y) \in \Pi_p$.

Далее действуем по схеме доказательства первой части.

На первом шаге ($p = m$) точки с координатами (0,0), (1,0), ..., $(B–b,0)$ подставляем в уравнение (5), а точки с координатами $(x,y) \in L^{m}{}_{\beta}$ – в уравнение (6). Получим однородную систему линейных уравнений. Так как эта система имеет только тривиальное решение $f(x,y) = 0$, то определитель этой системы $\Delta_{m,\beta}$ не равен нулю.

Продолжая процесс и подставляя в уравнения (5), (6) все точки $(x,y) \in \Pi_p$, на p-м шаге получим однородную систему линейных уравнений с определителем $\Delta_{p,\beta}$. Эта система имеет по условию только тривиальное решение, поэтому $\Delta_{p,\beta} \neq 0$.

Из теоремы 2 и леммы 1 сразу следует теорема 3.

Теорема 3. Задача (2)–(3) имеет единственное решение тогда и только тогда, когда $D_{p,\beta} \neq 0$ для всех $p = 0, 1, ...$

Доказательство теоремы 1. У определителя $\Delta_{p,\beta}$ на главной диагонали стоят единицы и выделенный коэффициент $c_{\beta m}$. Согласно лемме 1 имеем $\Delta_{p,\beta} = D_{0,\beta}\cdot D_{1,\beta} \cdots D_{p,\beta}$, где $D_{j,\beta}$ – главные миноры определителя $\Delta_{p,\beta}$ порядка $B+1$. Определители $D_{j,\beta}$ зависят только от коэффициентов многочлена $P_m(z) = \sum_{i=0}^{b} c_{im} z^i$. Если выполнено условие (4), то $D_{j,\beta}$ являются определителями матриц с диагональным преобладанием (говорят, что квадратная матрица $A = |a_{ij}|$ обладает свойством диагонального преобладания, если $|a_{ii}| \ge \sum_{j \ne i} |a_{ij}|$, $i = 1, 2, ..$, причем хотя бы одно неравенство является строгим), поэтому $D_{j,\beta} \neq 0$ (см., например, [8]). По теореме 3 задача (6)–(7) имеет единственное решение.

В качестве примера применения полученных результатов рассмотрим первую краевую задачу для уравнения теплопроводности [9]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} = \dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}, t > 0, 0 < x < l, \\ u(0,t) = u_1(t), u(l,t) = u_2(t), \\ u(x,0) = u_0(x) \end{cases}$$

и ее аппроксимацию разностной шеститочечной параметрической схемой вида

$$\frac{u_i^{m+1} - u_i^m}{\tau} = \sigma \frac{u_{i+1}^{m+1} - 2u_i^{m+1} + u_{i-1}^{m+1}}{h^2} + \\ +(1-\sigma)\frac{u_{i+1}^m - 2u_i^m + u_{i-1}^m}{h^2}, i = 1,\ 2,\ ...,\ N-1, \tag{9}$$

$$u^m{}_0 = u_1(t_m),\ u^m{}_N = u_2(t_m),\ u^0{}_i = u_0(x_i),\ m = 0,1\dots, \tag{10}$$

где $0 \le \sigma \le 1$ – произвольный вещественный параметр схемы.

Рассмотрим чисто неявную схему, т. е. $\sigma = 1$. Тогда (9) запишется в виде $\dfrac{u_i^{m+1} - u_i^m}{\tau} = \dfrac{u_{i+1}^{m+1} - 2u_i^{m+1} + u_{i-1}^{m+1}}{h^2}$. Обозначим $\gamma = \dfrac{\tau}{h^2}$, тогда $u_i^{m+1} - \dfrac{1}{1+2\gamma}u_i^m - \dfrac{\gamma}{1+2\gamma}u_{i+1}^{m+1} - \dfrac{\gamma}{1+2\gamma}u_{i-1}^{m+1} = 0$.

Если обозначить $a = -\dfrac{\gamma}{1+2\gamma}$, то в обозначениях данной работы разностный оператор будет иметь вид $P(\delta_1,\delta_2) = a\delta_2 + \delta_1\delta_2 + a\delta_1{}^2\delta_2 + (2a–1)\delta_1$, где $c_{01} = c_{21} = a$, $c_{11} = 1$.

Если переобозначить $u^m{}_i = f(i,m)$, то задача (9)–(10) для этой схемы примет вид

$$P(\delta_1,\delta_2)f(x,y) = 0,\ 0 < x < N–1,\ y = 0,\ 1,\ ..,$$

$$\varphi(x,y) = \begin{cases} f(0,y), y = 0,\ 1,\ .., \\ f(N,y), y = 0,\ 1,\ .., \\ f(x,0), x = 1,\ 2,\ ..,N-1. \end{cases}$$

Так как $2|a| < 1$, то выполнено условие диагонального преобладания (4) теоремы 1, следовательно, задача (10)–(11) имеет единственное решение.

Библиографические ссылки

1. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М. : Наука, 1971. 552 с.

2. Федорюк М. В. Асимптотика: интегралы и ряды. М. : Наука, 1987. 544 с.

3. Рогозина М. С. Устойчивость многослойных неоднородных разностных схем и амебы алгебраических гиперповерхностей // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 95–99.

4. Рогозина М. С. Разностный аналог одной теоремы Хермандера // Четвертое российско-армянское совещание по математической физике, комплексному анализу и смежным вопросам : тезисы докладов. Красноярск : Сиб. федер. ун-т. 2012. С. 60–62.

5. Ильин В. П., Лиснянский И. М. О решении алгебраических уравнений с ленточными теплицевыми матрицами // Сибирский математический журнал. 1978. Т. 19. Вып. 1. С. 44–48.

6. Хермандер Л. Введение в теорию функций нескольких комплексных переменных. М. : Мир, 1968. 280 с.

7. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Линейная алгебра. М. : Физматлит, 2005. 280 с.

8. Шарый С. П. Курс вычислительных методов. Новосибирск : Новосиб. гос. ун-т, 2010. 279 с.

9. Самарский А. А., Гулин А. В. Устойчивость разностных схем. М. : Наука, 1973. 416 с.

References

1. Samarskiy A. A. *Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem* [Introduction to the theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 552 p.

2. Fedorjuk M. V. *Asimptotika: integraly i rjady* [Asymptotics: integrals and series]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 544 p.

3. Rogozina M. S. [Stability of multilayer inhomogeneous difference schemes and amoebas of algebraic hypersurfaces]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 3 (49), p. 95–99. (In Russ.).

4. Rogozina M. S. [The difference analog of Hörmander's theorem]. *4th Russian-Armenian workshop on mathematical physics, complex analysis and related topics*. Krasnoyarsk, 2012, p. 60–62. (In Russ.).

5. Il'in V. P., Lisnjanskij I. M. [On the solution of algebraic equations with banded Toeplitz matrices]. *Sibirskij matematicheskij zhurnal*. 1978, vol. 19, no. 1, p. 44–48. (In Russ.).

6. Hermander L. *Vvedenie v teoriju funkcij neskol'kih kompleksnyh peremennyh* [Introduction to the theory of functions of several complex variables]. Moscow, Mir Publ., 1968, 280 p.

7. Il'in V. A., Poznjak Je. G. *Linejnaja algebra* [Linear Algebra]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 280 p.

8. Sharyj S. P. *Kurs vychislitel'nyh metodov* [Rate of computational methods]. Novosibirsk, Novosibirsk St. Univ. Pabl., 2010, 279 p.

9. Samarskiy A. A., Gulin A. V. *Ustoychivost' raznostnykh skhem* [Stability of difference schemes]. Moscow, Nauka Pabl., 1973, 416 p.

© Рогозина М. С., 2014

УДК 539.3

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 131–138

ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ И ВАРИАЦИОННО-РАЗНОСТНОЙ ФОРМУЛИРОВОК ЗАДАЧИ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА СТЕРЖНЯ ОТ СИЛ ИНЕРЦИИ

Р. А. Сабиров

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

Разработан вариационно-разностный метод расчета устойчивости прямолинейных стержней на осевые инерционные нагрузки. Рассмотрена дифференциальная с конечно-разностной аппроксимацией разрешающих уравнений и вариационно-разностная формулировка краевой задачи продольно-поперечного изгиба в перемещениях. Задача приводится к обобщенной проблеме собственных чисел $Ax = \lambda Bx$ *– для нетривиального вектора* x *требуется подобрать собственное число* λ *(здесь* A *– матрица жесткости,* B *– матрица внутренних сил инерции). При рассмотрении дифференциальной формулировки задачи особенностью инерционных нагрузок является то, что дискретная матрица* B *приобретает нулевые значения на главной диагонали (могут вырождаться и строки матрицы). Другая особенность связана с аппроксимацией дифференциальных уравнений методом сеток, что образует матрицу* B *несимметричной относительно главной диагонали. Обобщенная проблема не имеет решения, также не имеет решения ее обратная форма* $Bx = \lambda^* Ax$*, где* $\lambda^* = 1/\lambda$*. Приведение к проблеме собственных значений* $AB^{-1}x = \lambda Ex$ *и* $BA^{-1}x = \lambda^* Ex$*, где* A^{-1}*,* B^{-1} *– обратные матрицы,* E *– единичная матрица, не дает результата. Поэтому выполнен переход от дифференциальной формулировки задачи к вариационной формулировке с дискретизацией вариационно-разностным методом. Для данного подхода разработан алгоритм формирования матриц* A *и* B*, основанный на единых свойствах вариаций функционала. Здесь матрица* B *всегда симметрична относительно главной диагонали и положительно определена. Нули на главной диагонали присутствуют (это особенность нагрузки); однако строки не вырождаются.*

Показана методика решения задачи. Приведены примеры вычисления собственных значений и форм потери устойчивости. Найдены критические осевые ускорения, при которых закрепленный с обеих сторон стержень теряет устойчивость, и критические угловые скорости для стержней, вращающихся в барабане центрифуги. Исследована сходимость решений от сгущения конечно-разностной сетки. Цель: разработать метод расчета стержней на инерционные нагрузки.

Ключевые слова: расчет стержней, устойчивость, вариационно-разностный метод.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 131–138

FEATURES OF DIFFERENTIAL AND VARIATIONAL-DIFFERENTIAL FORMULATIONS OF THE PROBLEM OF THE LONGITUDINALLY CROSS BEND OF THE CORE FROM INERTIA FORCES

R. A. Sabirov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: aaa@mail.sibsau.ru; rashidsab@mail.ru

The variational-differential method of calculation of rectilinear cores stability on axial inertial loadings is developed. The formulations of the boundary value problem of longitudinal cross bending movements are calculated: differential formulation with a final and differential approximation of the allowing equations and variational-differential one. The task is reduced to the generalized problem of own numbers $Ax = \lambda Bx$ *– for an non-trivial vector* x *it is required to identify its own number* λ*, here A is a matrix rigidity, B is a matrix of internal forces of inertia. In considering the differential formulation of the task the main particularity of the inertial loads is that the discrete matrix B gets null values on the main diagonal (the rows of matrix can degenerate). Another feature is associated with the approximation of the differential equations by the method of grids, which forms the matrix B asymmetrical about the main diagonal. The*

generalized problem has no decision like its feedback form $Bx = \lambda^* Ax$ *where* $\lambda^* = 1/\lambda$. *Brining to the problem of eigenvalues* $AB^{-1}x = \lambda Ex$ *and* $BA^{-1}x = \lambda^* Ex$ *where* A^{-1} *and* B^{-1} *are the inverse matrix, E is the identity matrix, doesn't give any result. Therefore transition from the differential formulation of a task to the variation formulation with sampling by a variational and differential method is executed. The algorithm of formation of matrixes A and B is developed for this approach, which is based on uniform properties of variations of functional. Here the matrix* B *is always symmetric to the main diagonal and is positively defined. Zeros on the main diagonal were presented because it is a feature of loading, however rows don't degenerate.*

The technique of the solution of a task is shown. Examples of calculation of own values and forms of stability loss are given. The critical axial accelerations lose their stability and critical angular speeds for the cores rotating in a drum of the centrifuge when the core is fixed from both sides. Investigated the convergence of solutions from condensation of a finite-difference grid. Purpose: to develop a method of calculation of cores on inertial loadings.

Keywords: calculation of cores, stability, variational and differential method.

Совершенство конструкций техники космического назначения с позиции механики деформируемых сред связано с уменьшением массы, обеспечением прочности и жесткости в связи с активными воздействиями управления и космического пространства. В качестве конструкций, создающих ускорения в наземных условиях, можно назвать центрифугу для тренировки космонавтов, создающую центростремительное ускорение порядка $30g$ [1]; многофункциональные высокоскоростные центрифуги для решения медико-биологических проблем [2], развивающие скорость вращения до 500 об/с; в атомной промышленности [3] известные центрифуги имели скорость 2000 об/с.

Основоположниками расчета устойчивости конструкций являются Я. Бернулли, Л. Эйлер, Ж. Л. Лагранж, С. Д. Пуассон [4]. По проблемам устойчивости пластин, оболочек, стержневых систем назовем имена С. П. Тимошенко, А. В. Александрова, И. А. Биргера, А. С. Вольмира, Г. С. Писаренко, В. И. Феодосьева, П. М. Варвака, Я. Г. Пановко, Е. П. Попова, Ю. В. Захарова, В. А. Светлицкого, А. Ф. Смирнова, В. В. Кабанова, Л. П. Железнова, В. В. Новожилова, В. З. Власова, Х. М. Муштари, Э. И. Григолюка, В. В. Болотина, В. И. Мяченкова, Ю. В. Немировского, Н. П. Абовского, Я. М. Григоренко, Н. В. Пустового, А. Н. Андреева, Л. И. Шкутина, Н. А. Алфутова, С. Н. Кана.

Литература по расчету устойчивости стержней обширна. Ее обзор, начиная с книг [5; 6], до работ более современных исследователей, из которых назовем [7; 8], показал, что для защемленных по торцам стержней на действие изменяющихся инерционных осевых нагрузок аналитические решения неизвестны. Поэтому разработанную вариационно-разностную методику численного анализа устойчивости стержней от инерционных воздействий можно считать актуальной.

Рассмотрим дифференциальную формулировку задачи. При продольно-поперечном изгибе известно уравнение равновесия в системе координат $Oxyz$ [9]

$$EJw_{xxxx} - q_z = -N(x)w_{xx}, \qquad (1)$$

где E – модуль Юнга материала стержня; J – осевой момент инерции поперечного сечения, ориентированного в осях Oyz; $w = w(x)$ – функция прогиба стержня по направлению минимальной жесткости; $N(x)$ – функция продольного внутреннего усилия. При решении задачи на собственные значения поперечная распределенная нагрузка $q_z = 0$.

Выполним численный расчет продольно-поперечного изгиба стержня (рис. 1) методом конечных разностей. Для этого нанесем на область стержня длиной l (рис. 2) конечно-разностную сетку $1 \le i \le n+3$ с шагом $\lambda = l/n$. Здесь n – число шагов сетки в области стержня (число целое). Тогда $i = 1$ и $i = i+3$ – законтурные узлы, а $i = 2$ и $i = n+2$ – номера контурных узлов. Дифференциальные операторы в (1) для дискретной области стержня заменим конечно-разностными аналогами [10], что приводит к системе уравнений

$$\begin{gathered} w_{i-2} - 4w_{i-1} + 6w_i - 4w_{i+1} + w_{i+2} = \\ = -N_i \lambda^2 \left(w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}\right)/(EJ), \\ 1 \le i \le n+3. \end{gathered} \qquad (2)$$

Если прогибы и углы поворота торцов балки равны нулю

$$w(0) = 0,\ w(l) = 0 \text{ и } \vartheta(0) = dw(x)/dx\big|_{x=0} = 0,$$

$$\vartheta(l) = dw(x)/dx\big|_{x=l} = 0, \qquad (3)$$

тогда в (2) принимается

$$3 \le i \le n+1 \qquad (4)$$

и добавляются граничные условия:

$$w(0) = w_2 = 0,\ w(l) = w_{n+2} = 0,\ w_1 = w_3,\ w_{n+3} = w_{n+1}. \qquad (5)$$

Система тождеств (2) представляет обобщенную проблему собственных значений [11]

$$[A]\{\overline{w}\} = s[B]\{\overline{w}\}, \qquad (6)$$

где $[A]$ – матрица жесткости стержня; матрицу $[B]$ назовем матрицей внутренних инерционных сил; $\{\overline{w}\} = \{w_3 \quad w_4 \quad w_5 \quad ,\ldots, \quad w_{n-1} \quad w_n \quad w_{n+1}\}$ – собственный вектор; s – набор собственных чисел для

соответствующих форм потери устойчивости. Первой форме потери устойчивости соответствует минимальное собственное число s. Поясним прием (6) на модели балки с редкой сеткой $n = 8$. В этом случае зависимости (2)–(5) примут вид

$$\begin{bmatrix} 7 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 7 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \\ w_7 \\ w_8 \\ w_9 \end{Bmatrix} =$$

$$= \frac{\lambda^2}{EJ} \begin{bmatrix} 2N_3 & -N_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -N_4 & 2N_4 & -N_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -N_5 & 2N_5 & -N_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -N_6 & 2N_6 & -N_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -N_7 & 2N_7 & -N_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_8 & 2N_8 & -N_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_9 & 2N_9 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \\ w_7 \\ w_8 \\ w_9 \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

Отметим особенность (7). Здесь матрица B в общем виде не является симметричной матрицей относительно её главной диагонали.

Можно переформулировать прием вычисления (6) к виду

$$[B]\{\overline{w}\} = s^* [A]\{\overline{w}\}, \quad (8)$$

тогда первой форме потери устойчивости будет соответствовать максимальное собственное число s^*; причем $s = 1/s^*$.

Введем параметр q_x, имеющий смысл равномерно распределенной нагрузки, приложенной вдоль оси стержня (рис. 1, *а*). Тогда функция продольной силы (стержень является однажды статически неопределимой системой) равна

$$N(x) = q_x (l/2 - x), \quad 0 \le x \le l. \quad (9)$$

График (эпюру) функции (9) изобразим на рис. 1, *б*. Подставив (9) в (1), получим дифференциальное уравнение

$$EJw_{xxxx} = -q_x (l/2 - x) w_{xx}, \quad 0 \le x \le l, \quad (10)$$

которое дает уравнения (7) в следующем виде

$$\frac{EJ}{\lambda^4} \begin{bmatrix} 7 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 7 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \\ w_7 \\ w_8 \\ w_9 \end{Bmatrix} =$$

$$= \frac{q_x l}{8\lambda^2} \begin{bmatrix} 6 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & -6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \\ w_7 \\ w_8 \\ w_9 \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

Действительно, в (11) матрица внутренних инерционных сил B оказалась несимметричной относительно главной диагонали, также выродилось одно уравнение, что является еще одной особенностью дифференциальной формулировки задачи. Можно уйти от нулевого коэффициента на главной диагонали, добавив или убрав один узел конечно-разностной сетки или подобрав ненулевую нагрузку в узле. Однако несимметричность матрицы внутренних сил остается. Собственные значения и собственные векторы в (11) не могут быть вычислены, даже если задача будет приведена к виду (8).

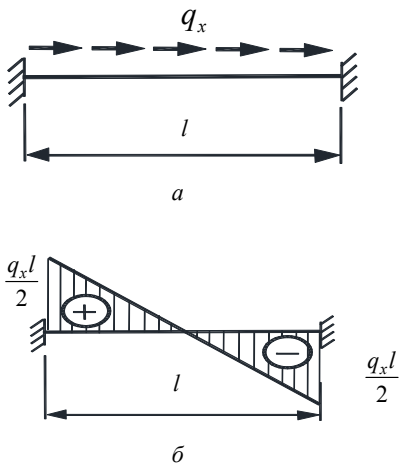


Рис. 1. Стержень, жестко закрепленный по краям:
а – нагрузка, действующая на стержень;
б – эпюра продольной силы

Для классической задачи устойчивости Эйлера с действующей на торец стержня силой P дифференциальная формулировка (1)–(2) проблемы собственных чисел дает решение. Внутренние силы: $N_i = -P$, $i = 3-9$; матрица B в (6) становится симметричной, причем

$$s = P\lambda^2 / EJ = Pl^2 / (64EJ). \quad (12)$$

Решение (6) даёт минимальное собственное число $s = 0{,}586$, подставив которое в (12), получаем минимальное значение силы P (значение критической силы), равное

$$P = 64\,EJ\,s / l^2 = 37{,}49EJ / l^2. \quad (13)$$

Представим возможную форму потери устойчивости в виде функции $w(x) = (1 - \cos 2\pi x / l)/2$ на интервале $0 \le x \le l$. Подставив производные этой функции

в уравнение (1), приняв $N(x) = -P$, получаем значение критической силы $P = 4EJ\pi^2 / l^2 = 39{,}48EJ / l^2$, практически не отличающееся от результата (13). Для уточнения величины P в численном расчете, следует сгустить конечно-разностную сетку.

Заключаем, что при дифференциальной формулировке задачи об ускорении, при переменном внутреннем усилии $N(x)$, решения нет.

Переформулируем краевую задачу (1) в интегральную формулировку [12; 13] в перемещениях. Левую часть (1), последовательным интегрированием по частям переведем в функционал Лагранжа:

$$Э_л(w) = -1/2\int_0^l EJ(x)\left(w_{xx}\right)^2 dx + \int_0^l q_z\, w(x)\,dx + Q_z(l)w(l) -$$

$$-Q_z(0)w(0) - M_x(l)\,\vartheta(l) + M_x(0)\,\vartheta(0), \qquad (14)$$

где $0 \le x \le l$; dx – длина бесконечно малого элемента; $Q(l)$, $Q(0)$, $M_x(l)$, $M_x(0)$ – поперечные силы и изгибающие моменты на торцах балки.

Преобразуем в (1) правую часть, которая представляет в уравнении равновесия проекцию внутренней силы на вертикальную ось. Запишем выражение возможной работы этой силы на возможном перемещении $\delta w(x)$. Дальнейшее интегрирование по частям дает

$$\int_{x=0}^{x=l} N(x)w_{xx}\delta w(x)\,dx = -\int_{x=0}^{x=l} N(x)w_x\delta w_x\,dx +$$

$$+N\left(l\right)\vartheta(l)\delta w(l) - N\left(0\right)\vartheta(0)\delta w(0). \qquad (15)$$

В (15) усилие $N(x)$ не варьируем, потому как оно является известной функцией. Присоединив выражение (15) к вариации функционала (14), получаем

$$\int_{x=0}^{x=l} EJ(x)w_{xx}\delta w_{xx}dx - \int_{x=0}^{x=l} q_z\,\delta w(x)\,dx - Q_z(l)\delta w(l) +$$

$$+Q_z(0)\delta w(0) + M_x(l)\,\delta\vartheta(l) - M_x(0)\,\delta\vartheta(0) =$$

$$= \int_{x=0}^{x=l} N(x)w_x\delta w_x\,dx - N\left(l\right)\vartheta(l)\delta w(l) - N\left(0\right)\vartheta(0)\delta w(0), \qquad (16)$$

добавив к которому главные граничные условия задачи (3), имеем вариационное уравнение

$$\int_0^l EJ(x)w_{xx}\delta w_{xx}dx = \int_{x=0}^{x=l} N(x)w_x\delta w_x\,dx. \qquad (17)$$

Сформируем коэффициенты матриц A и B в (6) выполнив варьирование (17), применив операторы варьирования δ_1 и δ_2:

$$\int_0^l EJ(x)\delta_1 w_{xx}\delta_2 w_{xx}dx = \int_{x=0}^{x=l} N(x)\delta_1 w_x\delta_2 w_x\,dx. \qquad (18)$$

Для вариационно-разностной реализации (18) введем на области стержня равномерную сетку $\omega_i = \{(x_i = i\lambda),\ i = 0,1,\ldots,n\}$ на отрезке $[0,l]$, где $x = x_i$ – узлы сетки; $\lambda = l/n$ – шаг сетки по направлению оси координат x. Введем вспомогательную сетку с узлами ξ: $\omega_\xi = \left\{x_\xi = \lambda/2 + i\lambda,\ i = 0,1,\ldots,n-1\right\}$. Континуальную область в (18) заменим дискретной, а дифференциальные операторы заменим конечно-разностными аналогами:

$$\sum_{i=2}^{n+2} EJ_i\,\frac{\delta_1 w_{i+1} - 2\delta_1 w_i + \delta_1 w_{i-1}}{\lambda^2}\,\frac{\delta_2 w_{i+1} - 2\delta_2 w_i + \delta_2 w_{i-1}}{\lambda^2}\,S_i =$$

$$= \sum_{\xi=1}^{\xi=n} N_\xi\,\frac{\delta_1 w_{i+1} - \delta_1 w_i}{\lambda}\,\frac{\delta_2 w_{i+1} - \delta_2 w_i}{\lambda}\,S_\xi, \qquad (19)$$

где S_i и S_ξ – площадки интегрирования: $S_\xi = \lambda$; $S_i = \lambda$ – во внутренних узлах i области; $S_i = \lambda/2$ – в узлах, расположенных на контуре; индексами $i = 1$ и $i = n+3$ обозначены законтурные номера узлов конечно-разностной сетки, а индексами $i = 2$ и $i = n+2$ – номера узлов, расположенных на торцах балки.

Тождество (19) содержит произведения вариаций $\delta_1 w_\alpha$ и $\delta_2 w_\alpha$, для $\alpha = 1,2,\ \ldots,\ n+3$, в котором учтем граничные условия (5), принимающие вид:

$$\delta_1 w(0) = \delta_1 w_2 = 0,\ \delta_1 w(l) = \delta_1 w_{n+2} = 0,$$

$$\delta_1 w_1 = \delta_1 w_3,\ \delta_1 w_{n+3} = \delta_1 w_{n+1};$$

$$\delta_2 w(0) = \delta_2 w_2 = 0,\ \delta_2 w(l) = \delta_2 w_{n+2} = 0,$$

$$\delta_2 w_1 = \delta_2 w_3,\ \delta_2 w_{n+3} = \delta_1 w_{n+1}.$$

Применив к выражению (19) циклы

$$\alpha = 3,4,\ldots,n+1,\quad j = 3,4,\ \ldots,\ n+1,$$

$$k = 3,4,\ \ldots,\ n+1, \qquad (20)$$

принимая

$$\delta_1 w_\alpha = \begin{cases} 1, & \text{при } \alpha = j, \\ 0, & \text{при } \alpha \ne j, \end{cases} \qquad \delta_2 w_\alpha = \begin{cases} 1, & \text{при } \alpha = k, \\ 0, & \text{при } \alpha \ne k, \end{cases}$$

получаем коэффициенты матриц A и B тождества (6).

Пусть $n = 4$, тогда тождество (6), с учетом (19)–(20) представится так:

$$\frac{1}{\lambda^4}\begin{bmatrix} 2EJ_2 + 4EJ_3 + EJ_4 & -2EJ_3 - 2EJ_4 & EJ_4 \\ -2EJ_3 - 2EJ_4 & EJ_3 + 4EJ_4 + EJ_5 & -2EJ_4 - 2EJ_5 \\ EJ_4 & -2EJ_4 - 2EJ_5 & EJ_4 + 4EJ_5 + 2EJ_6 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{Bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{\lambda^2}\begin{bmatrix} N_a + N_b & -N_b & 0 \\ -N_b & N_b + N_c & -N_c \\ 0 & -N_c & N_c + N_d \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{Bmatrix}. \qquad (21)$$

Здесь: N_a – внутреннее усилие в балке между узлами $i = 2$ и $i = 3$; N_b – внутреннее усилие между узлами $i = 3$ и $i = 4$, и т. д.

Таким образом, правая и левая части тождества (21) сформированы с использованием вариаций функционала Лагранжа, поэтому матрица жесткости и матрица внутренних сил инерции формируются по единой схеме. В левой части системы (21) матрица жесткости симметричная и содержит суммы параметров жесткости, что позволяет выполнять расчеты стержней переменной жесткости, как и должно, быть при интегральном подходе. В правой части (21) матрица внутренних инерционных сил по сравнению с матрицей правой части в (7) симметричная относительно главной диагонали, нули на главной диагонали не исключаются – последнее не препятствует решению проблемы собственных значений матриц.

Продемонстрируем методику расчета на примере действия на стержень (рис. 1) осевого ускорения; для наглядности процедуры вычисления нанесем на область стержня конечно-разностную сетку всего с четырьмя внутренними узлами. Согласно (9) внутренние усилия равны: $N_a = 3q_x l/4$, $N_b = q_x l/8$, $N_c = -q_x l/8$, $N_d = -3q_x l/4$. Пусть $EJ = \text{const}$, тогда из (21) получим

$$\frac{EJ}{\lambda^4}\begin{bmatrix} 7 & -4 & 1 \\ -4 & 6 & -4 \\ 1 & -4 & 7 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{Bmatrix} =$$

$$= \frac{q_x l}{\lambda^2}\begin{bmatrix} 7/8 & -1/8 & 0 \\ -1/8 & 0 & 1/8 \\ 0 & 1/8 & -7/8 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{Bmatrix}. \qquad (22)$$

В правой части (22) матрица B содержит нуль на диагонали, и определитель матрицы B равен нулю – обратной матрицы не существует. Покажем поиск решения системы (22). Для этого приведем план решения проблемы собственных значений (22) приемами (6) и (8) ниже.

Формируем системы тождеств:

$$[A]\{\overline{w}\} = s[B]\{\overline{w}\},$$

$$[B]\{\overline{w}\} = s^*[A]\{\overline{w}\}.$$

Здесь:

$$s = \frac{q_x l}{EJ}\lambda^2 = \frac{q_x}{EJ}4\lambda^3 = \frac{q_x l^3}{16EJ},$$

$$s^* = \frac{EJ}{q_x l \lambda^2} = \frac{16EJ}{q_x l^3} = \frac{EJ}{q_x 4\lambda^3}.$$

Запишем операторы в программе Maple [14]:

s:=evalf(Eigenvals(A, B, ve)),

s^*:=evalf(Eigenvals(B, A, ve)),

и получим:

$$s := [Float(\infty)\ 5{,}570484985\ -5{,}570484986],$$

$$s^* := [0{,}1795175826\ -2{,}910^{-11}\ -0{,}1795175830].$$

Собственные числа равны:

$s = -5{,}57$ (минимальное),

$s^* = 0{,}179$ (максимальное).

Вычислим критическую нагрузку:

$$q_x = \frac{16EJ}{l^3}s = \frac{16EJ}{l^3}(-5{,}57) = -89{,}12\frac{EJ}{l^3},$$

$$q_x = \frac{16EJ}{l^3 s^*} = \frac{16EJ}{l^3\, 0{,}179} = 89{,}12\frac{EJ}{l^3}.$$

Распечатаем ve – матрицы векторов, соответствующих собственным значениям:

$$\begin{bmatrix} 0.1428571423 & 1.000000000 & -0.1934378348 \\ 1.000000000 & 0.7020222581 & -0.7020222576 \\ 0.1428571428 & 0.1934378353 & -1.000000000 \end{bmatrix},$$

здесь третий столбец матрицы

$\{-0{,}19; -0{,}7; -1\}$

соответствует минимальному собственному числу,

$$\begin{bmatrix} 1.000000000 & 0.1428571437 & 0.1934378363 \\ 0.7020222554 & 1.000000000 & 0.7020222581 \\ 0.1934378345 & 0.1428571431 & 1.000000000 \end{bmatrix},$$

здесь первый столбец матрицы

$\{1;\ 0{,}7;\ 0{,}19\}$

соответствует максимальному собственному числу.

При перестановке матриц программа Maple изменила знаки собственных значений и собственных векторов. Матрицу $[B]$ удобнее представлять безразмерной, выражая произведение ql в качестве параметра, что дает $s = ql\lambda^2/EJ = ql^3 n^2/EJ$. Отсюда $q = n^2 EJs/l^3$. Обозначим через M – массу всего стержня, a_x – ускорение, действующее в продольном направлении стержня. Тогда $q_x l = M a_x$ и $M = \rho S l$, где ρ – плотность материала, S – площадь поперечного сечения стержня. Теперь по значению найденной критической нагрузки q_x вычисляется искомое критическое ускорение $a_x = q_x l/M = n^2 EJs/(l^2\rho S) = n^2 EJ/(l^2\rho S s^*)$. Продолжим поиск критического ускорения стержня (рис. 2), задав: $l = 18$ м; $E = 10^6$ Па; $\rho = 1$ кг/м^3; диаметр сечения трубки 1 см; толщина стенки 1 мм.

С целью исследования сходимости решения [14] выполним расчеты на различных сетках, начиная с $n = 8$ (рис. 2, *а*). Результаты приведем в табл. 1. На сетке $n = 64$ сходимость практически обеспечивается, что видно из графика сходимости ускорения a_x.

Низшую форму потери устойчивости покажем на рис. 2, *б*. Для конечно-разностных сеток $n = 8,\ 16,\ 32,\ 64,\ 128$ соответствующие значения s^*, q_x и a_x приведены в табл. 1. График сходимости ускорения a_x приведен на рис. 3. В этой задаче достаточно назначать $n = 32$.

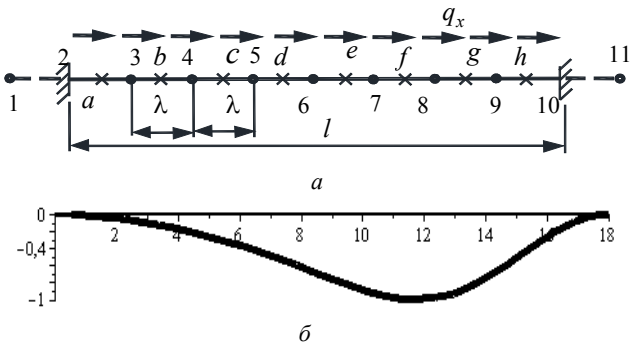


Рис. 2. Модель стержня, заделанного по обоим торцам:
а – конечно-разностная модель, сетка $n = 8$;
б – низшая (первая) собственная форма

Таблица 1

n	s^*	q_x	a_x
8	0,202	$6{,}76\cdot10^6\pi$	12,18
16	0,74	$7{,}38\cdot10^6\pi$	13,28
32	–2,92	$-7{,}53\cdot10^6\pi$	13,55
64	11,61	$7{,}56\cdot10^6\pi$	13,609
128	46,39	$7{,}6\cdot10^6\pi$	13,625

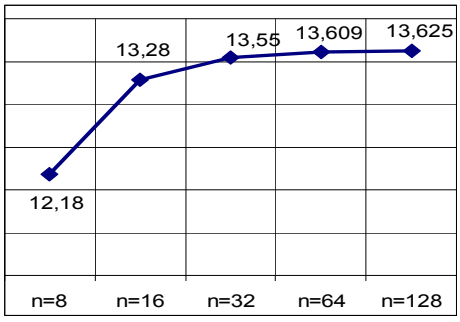


Рис. 3. График сходимости ускорения a_x

Рассмотрим вторую задачу. В барабане центрифуги (рис. 4), вращающемся вокруг вертикальной оси с угловой скоростью ω, расположены стержни, прикрепленные к стенкам барабана, направленные в радиальном направлении. Радиус барабана $R_2 = 0{,}6$ м; стержни трубчатые, длиной $l = 0{,}2$ м, радиусом по центру стенки $r = 2\cdot10^{-3}$ м, толщиной стенки $t = 1\cdot10^{-3}$ м. Радиус $R_1 = R_2 - l = 0{,}2$ м. Модуль Юнга материала стержня $E = 2\cdot10^{11}$ Па, а плотность материала $\rho = 780$ кг/м^3. Требуется определить критические скорости вращения ω барабана центрифуги с позиции устойчивости стержней. Площадь каждого стержня $S = 2\pi rt = 4\pi\cdot10^{-6}$ м^2; осевой момент инерции $J_x = \pi r^3 t = 8\cdot10^{-12}\pi$ м^4; радиус инерции $r_i = \sqrt{J_x / S} = 0{,}00141$ м. Гибкость стержня $\Lambda = l / r_i = 141{,}4$ – с воззрения сопротивления материалов – стержень гибкий.

Выберем начало системы координат Oxy в центре барабана (рис. 4, *а*). Тогда продольное инерционное внутреннее усилие $N(x)$ в стержне равно

$$N(x) = \left(\rho S\omega^2 / 2\right)(R_1^2 - x^2), \quad R_1 \le x \le R_2. \qquad (23)$$

На торце стержня $x = R_1$ известны силовые факторы: $Q(R_1) = 0$, $M_x(R_1) = 0$, $N(R_1) = 0$. На торце $x = R_1$ известны геометрические зависимости – линейные смещения и угол поворота отсутствуют. Приведем матрицу $[B]$ к безразмерному виду. Для этого (23) запишем так: $\hat{N}(x) = \left(R_1^2 - x^2\right) / \left(R_2^2 - R_1^2\right)$, $R_1 \le x \le R_2$. Теперь, к примеру для $n = 5$ (рис. 4, *б*), получим интегральное тождество (6) в виде

$$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 5 & -4 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 7 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{Bmatrix} =$$

$$= s \begin{bmatrix} 0{,}12 & -0{,}12 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}12 & 0{,}4 & -0{,}28 & 0 & 0 \\ 0 & -0{,}28 & 0{,}76 & -0{,}48 & 0 \\ 0 & 0 & -0{,}48 & 1{,}2 & -0{,}72 \\ 0 & 0 & 0 & -0{,}72 & 1{,}72 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{Bmatrix}. \qquad (24)$$

Здесь при безразмерных матрицах A и B имеем собственное число, равное

$$s = \lambda^2\omega^2\rho S / \left(R_2^2 - R_1^2\right). \qquad (25)$$

Учитывая $\lambda = l / n = \left(R_2 - R_1\right) / n$, из (25) получаем искомые значения угловой скорости в зависимости от n:

$$\begin{aligned} \omega &= n / (R_2 - R_1)\sqrt{\left(2R_2^2 - R_1^2\right) s / (\rho S)} = \\ &= n / (R_2 - R_1)\sqrt{\left(2R_2^2 - R_1^2\right) / (\rho S s^*)}. \end{aligned} \qquad (26)$$

Выполним расчеты на сетках $n = 8,\ 16,\ 32,\ 64,\ 128$. На сетке $n = 128$ формы потери устойчивости для первых трех низших собственных чисел покажем на рис. 4, *в*. Первую, вторую и третью угловые скорости обозначим, соответственно, символами $\omega^{(1)}$, $\omega^{(2)}$,

$\omega^{(3)}$; их значения, полученные для различных сеток, приведем в табл. 2.

Таблица 2

n	$\omega^{(1)}$	$\omega^{(2)}$	$\omega^{(3)}$
8	11,64	29,58	45,36
16	11,04	28,56	45,80
32	10,75	27,92	45,16
64	10,62	27,59	44,69
128	10,64	27,41	44,44

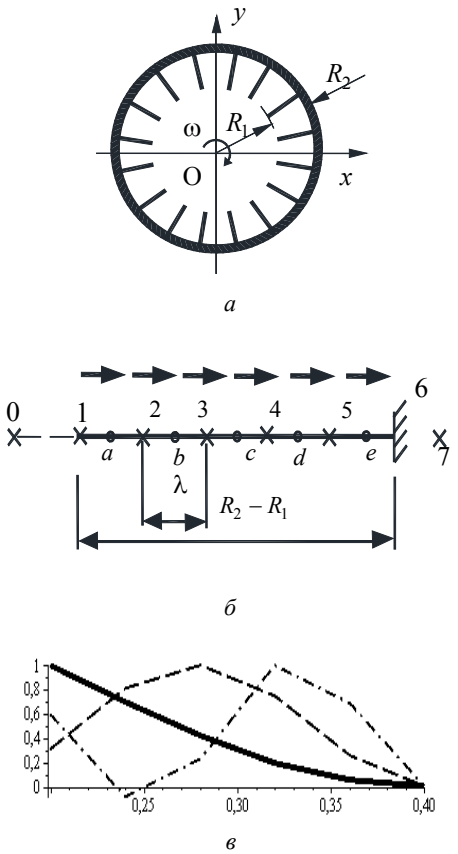


Рис. 4. Стержни, вращающиеся в центрифуге: *а* – барабан, вращающийся вокруг вертикальной оси; *б* – конечно-разностная модель стержня; *в* – формы потери устойчивости соответствующие критическим угловым скоростям: $\omega^{(1)} = 11{,}64$ об/с – сплошная линия; $\omega^{(2)} = 27{,}41$ об/с – штриховая линия; $\omega^{(3)} = 44{,}44$ об/с – штрихпунктирная линия

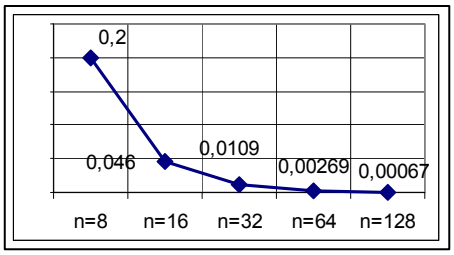


Рис. 5. График сходимости s

На графике сходимости (рис. 5) собственного числа s (25) от густоты сетки, видим достаточность сетки $n = 64$.

Таким образом, в задачах устойчивости стержней приложение вариационно-разностной формулировки краевой задачи исключает особенности, проявляющиеся при действии инерционных нагрузок – несимметричность матриц внутренних сил с вырождением отдельных строк в сравнении с конечно-разностной аппроксимацией дифференциальной формулировки. Примеры показали быструю сходимость решений в зависимости от густоты конечно-разностной сетки. Приложение вариационно-разностной формулировки позволит выполнять расчеты композитных стержней переменной жесткости.

Библиографические ссылки

1. Центрифуги. Технические характеристики центрифуги ЦФ-18 / Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина [Электронный ресурс]. URL: gctc.ru›print.php?id=131/ (дата обращения: 20.08.14).

2. Центрифуга высокоскоростная Avanti J-30I [Электронный ресурс]. URL: promix.ru›catalog.htm?catalogID=1538 (дата обращения: 2.08.14).

3. Ядерный волчок [Электронный ресурс]. URL: http://dn66.ru/fromnet/id/823-YAdernyiy-volchok.html/ (accessed 2012-10-01).

4. Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов с краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений. М. : Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1957. 536 с.

5. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. М. ; Л. : ОГИЗ-ГОСТЕХИЗДАТ, 1946. 532 с.

6. Попов Е. П. Нелинейные задачи статики тонких стержней. Л. ; М. : ОГИЗ, 1948. 170 с.

7. Светлицкий В. А. Механика стержней. Ч. 1. Статика. М. : Высш. шк. 1987. 320 с.

8. Захаров Ю. В., Охоткин К. Г. Нелинейный изгиб тонких упругих стержней // ПМТФ, 2002. Т.43, № 5. С. 124–131.

9. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.

10. Самарский А. А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1977. 656 с.

11. Молчанов И. Н. Машинные методы решения прикладных задач. Алгебра, приближение функций. Киев : Наук. думка, 1987. 288 с.

12. Ланцош К. Вариационные принципы механики : пер. с англ. М. : Мир, 1965. 408 с.

13. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности : пер. с англ. М. : Мир, 1987. 542 с.

14. Матросов А. В. Maple 6. Решение задач высшей математики и механики. СПб. : БХВ-Петербург, 2001, 528 с.

15. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. М. : Наука, 1978. 592 с.

References

1. *Centrifugi. Tehnicheskie harakteristiki centrifugi CF-18. "Nauchno-issledovatel'skij ispytatel'nyj centr podgotovki kosmonavtov im. Ju.A. Gagarina"* [Centrifuge. Specifications centrifuge CF-18. "Research and Testing Cosmonaut Training Center. Yury Gagarin"] (In Russ.) Available at: gctc.ru›print.php?id=131/ (accessed 20.08.14).

2. *Centrifuga vysokoskorostnaja Avanti J-30I* [High Speed Centrifuge Avanti J-30I] (In Russ.) Available at: promix.ru›catalog.htm?catalogID=1538 (accessed 2.08.14).

3. *Jadernyj volchok* [Nuclear dreidel] (In Russ.) Available at: URL: http://dn66.ru/fromnet/id/823-YAdernyiy-volchok.html/ (accessed 2012-10-01).

4. Timoshenko S. P. *Istorija nauki o soprotivlenii materialov s kratkimi svedenijami iz istorii teorii uprugosti i teorii sooruzhenij* [Science history about resistance of materials with short data from history of the theory of elasticity and the theory of constructions]. Moscow, Gos. izd-vo Tehniko-teoreticheskoj literatury, 1957, 536 p.

5. Timoshenko S. P. *Ustojchivost' uprugih sistem* [Stability of elastic systems]. Moscow – Leningrad, OGIZ GOSTEHIZDAT, 1946, 532 p.

6. Popov E. P. *Nelinejnye zadachi statiki tonkih sterzhnej* [Nonlinear problems of a statics of thin cores]. Leningrad – Moscow, OGIZ, 1948, 170 p.

7. Svetlickij V. A. *Mehanika sterzhnej. Ch. 1. Statika* [Mechanics of cores]. Moscow, Vyssh. Shk. Publ., 1987, 320 p.

8. Zaharov Ju. V., Ohotkin K. G. *Nelinejnyj izgib tonkih uprugih sterzhnej* [Nonlinear bend of thin elastic cores]. *PMTF*, 2002, Vol. 43, № 5, p. 124–131.

9. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teorija uprugosti* [Elasticity theory]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 576 p.

10. Samarskij A. A. *Teorija raznostnyh shem* [Theory of differential schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 656 p.

11. Molchanov I. N. *Mashinnye metody reshenija prikladnyh zadach. Algebra, priblizhenie funkcij* [Machine methods of the solution of applied tasks. Algebra, approach of functions]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 1987, 288 p.

12. Lancosh K. *Variacionnye principy mehaniki* [Variation principles of mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1965, 408 p.

13. Vasidzu K. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti* [Variation methods in the elasticity and plasticity theory]. Moscow, Mir Publ., 1987, 542 p.

14. Matrosov A. V. Maple 6. *Reshenie zadach vysshej matematiki i mehaniki* [Solution of problems of the higher mathematics and mechanics]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2001, 528 p.

15. Samarskij A. A., Nikolaev E. S. *Metody reshenija setochnyh uravnenij* [Methods of the solution of the net equations]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 592 p.

© Сабиров Р. А., 2014

УДК 519.6

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 139–145

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА*

М. Е. Семенкина, Е. С. Семенкин, И. С. Рыжиков

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, eugenesemenkin@yandex.ru, ryzhikov-88@yandex.ru

Рассматривается задача прогнозирования динамических характеристик солнечных батарей (БС) космического аппарата в условиях открытого космоса по имеющимся измерениям изменений параметров БС и соответствующих им параметров солнечной активности во время выполнения миссии. Для решения задачи предлагается использовать самоконфигурируемый генетический алгоритм для автоматического генерирования нейронных сетей с выбором структуры и наиболее информативных признаков и настройкой весовых коэффициентов, самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования неполносвязных нейронных сетей прямой проводимости, самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ансамблей нейросетевых предикторов. Выполняется оценка эффективности предложенных подходов при решении задачи прогнозирования процесса деградации солнечных батарей космического аппарата и производится сравнение эффективности алгоритмов. Среди исследованных подходов, не использующих технику ансамблирования, наибольшую эффективность показал самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования нейросетевых предикторов. Самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ансамблей нейросетевых предикторов продемонстрировал наиболее высокую эффективность по сравнению с рассмотренными аналогами.

Ключевые слова: солнечные батареи космического аппарата, прогнозирование деградации электрических характеристик, нейросетевые предикторы, автоматическое проектирование, самоконфигурируемые эволюционные алгоритмы.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 139–145

DYNAMICS FORECASTING FOR ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SPACECRAFT SOLAR ARRAYS BY MEANS OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE

M. E. Semenkina, E. S. Semenkin, I. S. Ryzhikov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: semenkina88@mail.ru, eugenesemenkin@yandex.ru, ryzhikov-88@yandex.ru

We consider the problem of forecasting the degradation process of spacecraft's solar arrays according to their available parameter changes measured together with the corresponding parameters of solar activity during the fulfilment of the real spacecraft's mission. The application of ANN-based predictors is proposed because of their generalization ability. In this paper, predictors automated design with self-adaptive evolutionary algorithms is suggested because of the ANN efficiency dependence on the choice of an effective structure and the successful tuning of weight coefficients. The adaptation of evolutionary algorithms is implemented on the base of the algorithms' self-configuration. In self-configuration technique, setting variants were used instead of the adjusting real parameters, namely types of selection, crossover, population control and level of mutation. Each of these has its own initial probability distribution which is changed as the algorithm executes. ANN-based predictors are automatically designed with the self-configured genetic algorithm and the self-configured genetic programming algorithm. In both cases the most informative features are selected for each neural network. Besides, the self-configuring genetic programming is

* Работа выполняется в соответствии с государственным заказом по тематическому плану Сибирского государственного аэрокосмического университета (проекты 140/14 и 72/14).

used for the automated design of ensembles of ANN-based predictors. The performance of developed algorithms for automated design of ANN-based predictors is estimated on real-world data and the most perspective approach is determined. Self-configuring genetic programming algorithm for automated ANN design has the best performance among non-ensemble techniques. Self-configuring genetic programming for the automated design of ensembles presents the best result among all considered approaches.

Keywords: spacecraft solar array, degradation forecasting, ANN-based predictors, automated design, self-configuring evolutionary algorithms.

Введение. Развитие таких источников энергии, как солнечные батареи (БС) имеет существенное значение для будущего космической отрасли. Однако эффективность применения подобных систем в открытом космосе существенно зависит от влияния окружающей среды, которое приводит к деградации солнечных батарей. Наземное тестирование БС является дорогой и требующей много времени процедурой, поэтому применение интеллектуальных инструментов для прогнозирования деградации солнечных батарей может значительно повысить эффективность использования БС.

В качестве интеллектуальных технологий прогнозирования для данной задачи могут применяться методы вычислительного интеллекта, в частности нейронные сети, в связи с их известным свойством высокого уровня обобщения [1], а также ансамбли нейронных сетей для повышения качества прогнозирования. Однако даже создание отдельной искусственной нейронной сети (ИНС) требует высокого уровня экспертных знаний для выбора ее эффективной структуры и настройки весовых коэффициентов, а создание ансамблей интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) является задачей на порядок более сложной. Для автоматизации решения этих задач могут быть применены эволюционные алгоритмы [2], эффективность которых, однако, существенно зависит от выбора их настроек, что также требует привлечения экспертов в области эволюционных вычислений. В данной работе предлагается применять самоконфигурируемые эволюционные алгоритмы (SelfCEA) [3–5], производящие автоматический выбор структуры алгоритма и подстройку его параметров под решаемую задачу, для автоматического генерирования нейросетевых предикторов и их ансамблей, что позволит существенно расширить круг специалистов, использующих технологии вычислительного интеллекта для решения практических задач.

Постановка задачи. Необходимо разработать математическую модель для предсказания деградации солнечных батарей космического аппарата в условиях открытого космоса по имеющимся измерениям изменений параметров БС и соответствующим им параметрам солнечной активности во время выполнения миссии.

В качестве входов используются параметры внешней среды, такие как интегральные флюенсы протонов с различными уровнями энергии (< 1МВ, < 10 МВ, < 100 МВ) и электронов с различными уровнями энергии (< 0,6 МВ, < 2 МВ), количество дней после отделения космического аппарата, характеризующее урон, нанесенный панелям солнечных батарей метеорами и УФ-радиацией, и коэффициент освещенности космического аппарата – параметр, характеризующий степень освещенности аппарата. В качестве выходных параметров, значения которых необходимо предсказать, используются напряжение холостого хода $U_{хх}$ БС и сила тока короткого замыкания $I_{кз}$ БС для обеих секций БС космического аппарата, т. е. имеется 4 выходных параметра. Выборка для данной задачи состоит из полетных данных для 295 дней и содержит 7 входов и 4 выхода. Информация о первых 169 днях полета будет использована для обучения предикторов, а остальная часть – для оценки эффективности полученной модели. Для всех используемых подходов ошибка прогнозирования будет оцениваться по следующей формуле:

$$error = \frac{100}{s}\frac{1}{m}\sum_{i}^{m}\frac{1}{y^i_{\max} - y^i_{\min}}\sum_{j}^{s}\left|y^i_j - o^i_j\right|,$$

где s – размер тестовой выборки; m – количество выходов; y – значение выхода; o – значение соответствующего выхода модели.

Таким образом, необходимо разработать предикторы деградации БС космического аппарата (КА) на основе полетных данных. В данной статье предикторы будут формироваться автоматически при помощи самоконфигурируемых эволюционных алгоритмов в виде отдельных нейронных сетей и их ансамблей.

Самоконфигурируемые эволюционные алгоритмы. Эволюционные алгоритмы (ЭА) хорошо известны как эффективное средство решения сложных задач оптимизации [6], однако эффективность их применения существенно зависит от выбора вариантов их операторов и настройки параметров. Данный недостаток служит существенным препятствием для применения эволюционных алгоритмов конечными пользователями, не являющимися экспертами в этой области, например, инженерами космической отрасли. В данной статье предлагается использовать подход, позволяющий автоматизировать выбор подходящей к задаче алгоритмической схемы и основанные на нем алгоритмы: самоконфигурируемый генетический алгоритм (SelfCGA) [3] и самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования (SelfCGP) [4]. Все рассматриваемые самоконфигурируемые эволюционные алгоритмы (SelfCEA) позволяют производить централизованную настройку их параметров в процессе запуска. В качестве элементов конфигура-

ции эволюционных алгоритмов используются 5 типов селекции (пропорциональная, ранговая, турнирная с размерами турнира 3, 5, 9), 6 типов скрещивания (стандартное для SelfCGP, двухточечное для SelfCGA и одноточечное, равновероятное равномерное, пропорциональное равномерное, турнирное равномерное, ранговое равномерное для обоих [7]), 3 уровня мутации для SelfCGA (низкая, средняя и высокая вероятности мутации) и 2 типа мутации с теми же 3 уровнями для SelfCGP (точечная мутация и мутация деревьями). Вероятности применения каждого типа оператора:

– устанавливаются равными при запуске алгоритма;

– изменяются на каждом поколении согласно средней пригодности полученных при помощи конкретного типа оператора потомков, но не могут быть меньше заданного порога;

– используются для выбора конфигурации алгоритма, применяемого для порождения очередного потомка.

Подробное описание способа настройки вероятностей применения операторов можно найти в [5], а анализ их изменения в процессе запуска – в [8]. Оба рассматриваемых алгоритма были протестированы на репрезентативном множестве тестовых задач оптимизации для SelfCGA [3] и символьной регрессии для SelfCGP [4], статистическая устойчивость полученных результатов была оценена при помощи ANOVA. Анализируя результаты их тестирования [3–5], можно увидеть, что самоконфигурируемые алгоритмы обладают большей надежностью, чем средняя надежность лучшего отдельного алгоритма, но в отдельных случаях уступают наиболее высокой надежности лучшего отдельного алгоритма. Отметим, что определить лучший алгоритм для конкретной задачи можно только исчерпывающим перебором всех возможных конфигураций, что требует чрезвычайных вычислительных затрат. При этом не существует лучшего алгоритма, подходящего для всех задач, и он должен определяться каждый раз заново. Оба алгоритма, SelfCGA и SelfCGP, могут быть использованы для автоматического выбора структур нейросетевых предикторов, кроме того, SelfCGA может быть применен для настройки их весовых коэффициентов, а SelfCGP – для автоматического генерирования ансамблей нейросетевых предикторов.

Автоматическое генерирование искусственных нейронных сетей. Для эффективного решения задачи прогнозирования необходимо производить выбор подходящей структуры для искусственной нейронной сети. Ниже будут рассмотрены SelfCGA для автоматического выбора числа слоев, нейронов на слое и типов их функции активации для многослойного персептрона и SelfCGP для автоматического генерирования нейронных сетей прямой проводимости с произвольной структурой [5; 9].

Автоматическое генерирование нейронных сетей с помощью SelfCGA. Генетические алгоритмы работают с решениями, представленными в виде бинарных строк конечной длины. Поэтому необходимо представить проектируемую нейронную сеть в виде такой структуры данных. В качестве максимального размера структуры нейронной сети были выбраны 5 скрытых слоев и 5 нейронов на каждом из них, кроме того, каждый из нейронов мог использовать одну из 15 известных активационных функций (сигмоиды, линейные, пороговые и т. п.). Каждый нейрон кодировался в виде бинарной строки из 4 бит. Если строка состояла из нулей («0000»), то считалось, что данный нейрон отсутствует в ИНС, иначе номер активационной функции определялся посредством перевода бинарного числа в целое. Таким образом, структура скрытых слоев нейронной сети целиком кодировалась в виде бинарной строки из 100 битов, кроме того, все нейронные сети имели одинаковый выходной слой и настраиваемый входной слой. В данной работе также использовалась возможность для автоматического выбора наиболее существенных входов. Для этого в начало бинарной строки, кодирующей структуру нейронной сети, были добавлены дополнительные биты, отвечавшие за использование («1») или неиспользование («0») каждого входа. В процессе инициализации вход считался несущественным с вероятностью равной 1/3. Применение данной идеи должно помочь пользователям избежать существенной и сложной процедуры выбора наиболее важных для эффективности модели входных переменных.

В данной статье для оптимизации структуры ИНС, закодированной в бинарную хромосому, использовался SelfCGA, и при настройке весовых коэффициентов для каждой структуры применялся SelfCGA с последующим локальным спуском. Эффективность предлагаемого подхода была оценена на репрезентативном множестве тестовых задач, кроме того, была выполнена проверка статистической значимости полученных результатов. По результатам тестирования можно заключить, что самоконфигурируемый генетический алгоритм для автоматического выбора структуры ИНС (SelfCGA+ANN) является эффективным средством решения задач аппроксимации и может быть применен для решения практических задач анализа данных.

Автоматическое генерирование нейронных сетей с помощью SelfCGP. Как правило, алгоритм генетического программирования работает с деревьями, в связи с чем для кодирования ИНС в дерево были изменены функциональное и терминальное множества. В функциональное множество были включены операции по постановке нейронов (групп нейронов) в один слой или последовательные слои, что позволило генерировать непослойно связные нейронные сети. В терминальное множество включены входные переменные и 16 функций активации, в связи с чем получаемые нейронные сети могут использовать не все входные переменные, но при этом обладать высокой эффективностью. SelfCGA с последующим локальным спуском использовался при настройке весовых коэффициентов, а для оптимизации структуры ИНС, закодированной в виде дерева, применялся SelfCGP.

Эффективность рассматриваемого самоконфигурируемого алгоритма генетического программирования для автоматического генерирования ИНС (SelfCGP+ANN) была оценена на репрезентативном множестве тестовых задач аппроксимации (статистическая значимость проверена при помощи ANOVA) [5; 9]. Результаты тестирования показали, что нейронные сети, сгенерированные SelfCGP, используют небольшое количество нейронов по сравнению с многоуровневыми персептронами и не являются полносвязными (небольшое число связей между нейронами), а кроме того, не используют все возможные входные переменные, т. е. снижают размерность поискового пространства.

Автоматическое генерирование ансамблей интеллектуальных информационных технологий с помощью SelfCGP. После автоматической генерации отдельных нейросетевых предикторов, не требующей выбора настроек используемых алгоритмов, имеет смысл применить методики ансамблирования для повышения качества решения задачи. В данной работе рассматриваются как стандартные методы коллективного принятия решения, такие как простое усреднение, взвешенное усреднение и бэггинг, так и самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для формирования общего метода принятия решений коллективом ИИТ на основе создания символьного выражения с различными ИИТ в качестве элементов терминального множества (SelfCGP-E) [10–12]. SelfCGP-E включает в себя различные арифметические операции и математические функции и использует модели разных видов для обеспечения разнообразия среди участников ансамбля. Далее в численных экспериментах в качестве членов ансамбля используются символьные выражения и нейронные сети, автоматически разработанные при помощи SelfCGP и SelfCGA. Из сформированного заранее предварительного пула ИИТ алгоритм автоматически выбирает конкретные ИИТ, которые вносят существенный вклад в эффективность решения, и не использует другие. Предварительный пул ИИТ включает в себя 20 ИНС и 20 символьных выражений, заранее порожденных алгоритмом SelfCGP.

Результаты решения задачи прогнозирования динамики электрических характеристик солнечных батарей космических аппаратов. Для решения поставленной задачи прогнозирования динамики электрических характеристик солнечных батарей были использованы следующие средства вычислительного интеллекта:

1. Самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ИНС (SelfCGP+ANN) [5; 9].
2. Самоконфигурируемый генетический алгоритм для автоматического генерирования ИНС (SelfCGA+ANN).
3. Самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для решения задач символьной регрессии (SelfCGP+SRF) [4].
4. Ансамбль нейронных сетей, основанный на простом усреднении (ANN+s.a.).
5. Ансамбль нейронных сетей, основанный на взвешенном усреднении (ANN+w.a.).
6. Ансамбль нейронных сетей, основанный на бэггинге (ANN+bagging), т. е. все участники ансамбля проходили обучение на различных подмножествах обучающей выборки [13].
7. Самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ансамблей интеллектуальных информационных технологий (SelfCGP-E) [11].
8. Самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ансамблей интеллектуальных информационных технологий с использованием техники бэггинга (SelfCGP-E+bagging) [12].

Дополнительно для сравнения были использованы следующие подходы:

1. Предикторы, основанные на нечеткой логике (FL) и нейронечетких системах (NFL), сгенерированные при помощи генетического алгоритма [14].
2. Предикторы, основанные на ансамблях нейронных сетей, сгенерированных с помощью обычного алгоритма генетического программирования (GPEN) [15].
3. Предикторы, основанные на ансамблях нейронных сетей (GASEN) [15].

Результаты для всех методик, представленных в статье, приведены в табл. 1. В первых четырех столбцах приведены значения ошибок прогнозирования (в процентах) для соответствующих выходов. В столбце «Mean» приведены значения ошибок, усредненные по всем выходам. Первое число в каждой ячейке является лучшим найденным значением ошибки для каждого алгоритма. Ошибки, усредненные по всем запускам алгоритма, представлены в скобках. Результаты для альтернативных подходов представлены в табл. 2.

Легко увидеть, что SelfCGP для автоматического генерирования ИНС демонстрирует лучший результат среди отдельных интеллектуальных информационных технологий. В частности, относительная ошибка равна 4,319 для первого выхода, что соответствует величине в 0,1597 В из возможных 3,6971 В. Самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ансамблей нейросетевых предикторов без применения бэггинга превосходит как отдельные интеллектуальные информационные технологии, так и альтернативные методы создания ансамблей. Можно заметить, что только методы ансамблирования на основе самоконфигурируемого алгоритма генетического программирования не ухудшили результат по сравнению с отдельными нейронными сетями. Кроме того, добавление бэггинга ухудшило результат, что может быть связано с малым размером выборки.

Как правило, SelfCGP и SelfCGA использовали только 6 входов из 7 и игнорировали интегральный флюенс протонов с наименьшей энергией. Если говорить о сложности модели, то можно сказать, что предложенный подход для генерирования ансамблей (формирование математического выражения генетическим

программированием) не приносит дополнительных проблем по сравнению с любой другой техникой создания решения коллектива. Конечно, расчетная модель, получаемая SelfCGP, может быть гораздо более сложной по сравнению с обычными коллективными методами (взвешенное суммирование, голосование). Однако эксперименты показывают, что SelfCGP никогда не использует все доступные модели в одном ансамбле, включая только некоторые из них, в то время как обычные коллективные методы используют все доступные модели, что увеличивает время срабатывания.

Таблица 1

Результаты методик вычислительного интеллекта для задачи прогнозирования динамики электрических характеристик БС КА

Алгоритмы	1	2	3	4	Mean
SelfCGP-E	3,703 (3,883)	3,564 (3,725)	4,047 (4,182)	4,726 (4,930)	4,01 (4,18)
SelfCGP-E+ +bagging	3,998 (4,287)	3,801 (4,01)	4,26 (4,953)	5,301 (5,35)	4,34 (4,65)
ANN+bagging	4,934 (5,308)	4,746 (5,144)	5,306 (5,698)	6,254 (6,73)	5,31 (5,72)
ANN+w.a.	4,7234 (5,175)	4,586 (4,892)	5,1963 (5,541)	6,0543 (6,432)	5,14 (5,51)
ANN+s.a.	4,931 (5,01)	4,674 (4,813)	5,264 (5,306)	6,211 (6,231)	5,27 (5,34)
SelfCGP+ANN	4,3196 (5,0442)	4,1441 (4,9392)	4,65 (5,53)	5,4863 (6,2066)	4,65 (5,43)
SelfCGP+SRF	4,6726 (5,7688)	4,4827 (5,5344)	5,03 (6,21)	5,9346 (7,3268)	5,03 (6,21)
SelfCGA+ANN	4,8584 (5,2672)	4,661 (5,0531)	5,232 (5,671)	6,17056 (6,6897)	5,23 (5,67)

Таблица 2

Лучшие результаты альтернативных подходов

Алгоритм	GPEN	GASEN	NFL	FL
Mean	4,29	5,23	5,87	7,66

Большую часть вычислительной сложности ансамбля составляют вычислительные усилия, необходимые для расчета выхода для каждой модели, поэтому предложенный подход имеет преимущество над обычными коллективными методами, которые включают в ансамбли все доступные отдельные модели (20 ИНС в нашем случае). В то же время при добавлении бэггинга к предложенному методу создания ансамблей при помощи SelfCGP количество используемых членов ансамбля возрастает в 2–3 раза, но при этом не происходит повышение эффективности.

Сравнивая обе таблицы, можно увидеть, что подходы, генерирующие отдельные ИИТ, описанные в этой статье, существенно превосходят алгоритмы на основе нечеткой логики (NFL, FL) и уступают методам, использующим ансамбли. Описанный в данной статье метод создания ансамблей при помощи самоконфигурируемого алгоритма генетического программирования (SelfCGP-E) превосходит все рассматриваемые альтернативные подходы.

Заключение. В данной статье описаны два способа для автоматического генерирования нейросетевых предикторов и метод создания ансамблей предикторов для решения задачи прогнозирования динамики электрических характеристик солнечных батарей космического аппарата, их эффективность оценена на реальных данных. Предложенные подходы отличаются от альтернативных способностью автоматически адаптироваться под решаемую задачу. Самоконфигурируемые алгоритмы не требуют от конечных пользователей экспертных знаний о методах вычислительного интеллекта. Наиболее высокую эффективность продемонстрировал самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ансамблей нейросетевых предикторов.

Направлениями дальнейших исследований могут быть как расширение подхода с использованием автоматически проектируемых нечетких классификаторов [16], что может дать интерпретируемые человеком-экспертом правила, так и задействование новых эффективных подходов [17], с помощью которых можно повысить эффективность решения задачи. Отдельным перспективным направлением исследования динамики электрических характеристик БС КА является автоматическое построение линейной динамической модели по результатам наблюдения за поведением системы [18; 19].

Библиографические ссылки

1. Zhang G., Patuwo B. E., Hu M. Y. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art // International Journal of Forecasting. 1998. 14. P. 35–62.
2. Ефимов С. Н., Семенкин Е. С., Тынченко В. В. Многокритериальный многопопуляционный генетический алгоритм для структурно-параметрического синтеза нейросетевых моделей // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 1.3 (35). С. 346–350.
3. 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.
4. 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.
5. Семенкина М. Е. Самоадаптивные эволюционные алгоритмы проектирования информационных технологий интеллектуального анализа данных // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 1. С. 13–23.
6. Об эволюционных алгоритмах решения сложных задач оптимизации / А. В. Гуменникова [и др.] // Вестник СибГАУ. 2003. № 4. С. 14–23.

7. 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.

8. Семенкина М. Е., Семенкин Е. С. Исследование поведения самоконфигурируемого алгоритма генетического программирования // Системный анализ и информационные технологии : Тр. пятой Междунар. конф. 2013. Т. 2. С. 78–87.

9. 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. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 25–32.

10. 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.

11. Semenkina M., Semenkin E. Integration of Intelligent Information Technologies Ensembles with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm // Vestnik of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. 2012. № 4 (44). P. 89–96.

12. Semenkina M., Semenkin E. Classifier Ensembles Integration with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm // Adaptive and Natural Computing Algorithms. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 7824. Springer-Verlag, Berlin, Hedelberg, 2013. P. 60–69.

13. Breiman L. Bagging predictors // Machine Learning. 1996. Vol. 24 (2). P. 123–140.

14. Shabalov A., Semenkin E., Galushin P. Integration of Intelligent Information Technologies Ensembles for Modeling and Classification // Proc. of Hybrid artificial intelligent systems 7th Intern. Conf., HAIS 2012. Salamanca, Spain, 2012. P. 365–374.

15. Bukhtoyarov V., Semenkin E., Shabalov A. Neural Networks Ensembles Approach for Simulation of Solar Arrays Degradation Process // Proc. of Hybrid artificial intelligent systems 7th Intern. Conf., HAIS 2012. Salamanca, Spain, 2012. P. 186–195.

16. Semenkina M., Semenkin E. Hybrid Self-configuring Evolutionary Algorithm for Automated Design of Fuzzy Classifier // Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 8791. P. 1. Springer-Verlag, Berlin, Hedelberg, 2014. P. 310–317.

17. Akhmedova Sh., Semenkin E. Data Mining Tools Design with Co-operation of Biology Related Algorithms // Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 8791. P. 1. Springer-Verlag, Berlin, Hedelberg, 2014. P. 499–506.

18. Ryzhikov I., Semenkin E. The Application of Evolutionary Algorithm for the Linear Dynamic System Modelling // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Simulation and Modelling Methodologies, Technologies and Applications. 2012. P. 234–237.

19. Ryzhikov I., Semenkin E. Modified Evolutionary Strategies Algorithm in Linear Dynamic System Identification // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2012. P. 618–621.

References

1. Zhang G., Patuwo B. E., Hu M. Y. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International Journal of Forecasting 14.* 1998, vol. 14, p. 35–62.

2. Efimov S. N., Semenkin E. S., Tynchenko V. V. [Multi-criteria multi-population genetic algorithm for the structure design and parameters tuning of neural networks based models]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii.* 2009, vol. 35, no. 1.3, p. 346–350. (In Russ.)

3. 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.* 2012, vol. 7331, p. 414–421.

4. 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.

5. 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.)

6. Gumennikova A. V., Emelyanova M. N., Semenkin E. S., Sopov E. A. [On evolutionary algorithms of complex optimization problems solving]. *Vestnik SibGAU.* 2003, no. 4, p. 14–23. (In Russ.)

7. Semenkin E. S., Semenkina M. E. [Application of genetic algorithm with modified uniform recombination operator for automated implementation of intelligent information technologies]. *Vestnik SibGAU.* 2007, no. 3(16), p. 27–33. (In Russ.)

8. Semenkina M. E., Semenkin E. S. [Investigation of self-configuring genetic programming algorithm behavior]. *Trudy pjatoj mezhdunarodnoj konferentsii "Sistemnyj analiz i informatsionnye tekhnologii".* 2013, vol. 2, p. 78–87. (In Russ.)

9. 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*. 2012, p. 25–32.

10. Semenkin E. S., Shabalov A. A., Efimov S. N. [Automated design of intelligent information technology collectives by means of genetic programming techniques]. *Vestnik SibGAU.* 2011, no. 3 (36), p. 77–81. (In Russ.)

11. Semenkina M., Semenkin E. [Integration of Intelligent Information Technologies Ensembles with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm]. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 4 (44), p. 89–96. (In Russ.)

12. Semenkina M., Semenkin E. [Classifier Ensembles Integration with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm]. *Adaptive and Natural Computing Algorithms,*

Lecture Notes in Computer Science. 2013, vol. 7824, p. 60–69.

13. Breiman L. [Bagging predictors]. *Machine Learning*. 1996, vol. 24 (2), p. 123–140.

14. Shabalov A., Semenkin E., Galushin P. [Integration of Intelligent Information Technologies Ensembles for Modeling and Classification]. *Proc. of Hybrid artificial intelligent systems 7th International Conference, HAIS 2012.* Salamanca, Spain, 2012, p. 365–374.

15. Bukhtoyarov V., Semenkin E., Shabalov A. [Neural Networks Ensembles Approach for Simulation of Solar Arrays Degradation Process]. *Proc. of Hybrid artificial intelligent systems 7th International Conference, HAIS 2012.* Salamanca, Spain, 2012, p. 186–195.

16. 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. 8794, part 1, p. 310–317.

17. Akhmedova Sh., Semenkin E. [Data Mining Tools Design with Co-operation of Biology Related Algorithms]. *Advances in Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*. 2014, vol. 8794, part 1, p. 499–506.

18. Ryzhikov I., Semenkin E. [The Application of Evolutionary Algorithm for the Linear Dynamic System Modelling]. *Proc. of the 2nd International Conference on Simulation and Modelling Methodologies, Technologies and Applications.* 2012, p. 234–237.

19. Ryzhikov I., Semenkin E. [Modified Evolutionary Strategies Algorithm in Linear Dynamic System Identification]. *Proc. of the 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics.* 2012, p. 618–621.

© Семенкина М. Е., Семенкин Е. С.,
Рыжиков И. С., 2014

УДК 519.7; 519.66; 57.087.1, 612.087.1

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 146–150

БИОМЕТРИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА: СГЛАЖИВАНИЕ ГИСТОГРАММ, ПОСТРОЕННЫХ НА МАЛОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКЕ

Н. И. Серикова[1], А. И. Иванов[2], С. В. Качалин[1]

[1]Пензенский государственный университет
Российская Федерация, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40
E-mail: cnit@pnzgu.ru
[2]Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт
Российская Федерация, 440000, г. Пенза, ул. Советская, 9
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Рассматривается вопрос улучшения устойчивости статистических вычислений при малой обучающей выборке за счет усложнения статистической обработки исходных данных. Показано, что достоверность оценивания закона распределения малых выборок биометрических данных может быть увеличена за счет сглаживания гистограмм. Предлагается использовать некоторый цифровой фильтр, который будет осуществлять сглаживание традиционной гистограммы, и за счет этой дополнительной обработки улучшится устойчивость статистических вычислений. Корректный выбор окна цифрового фильтра сглаживания и многократное искусственное увеличение числа дискрет, используемых при цифровой фильтрации, дает возможность существенно увеличить мощность критерия согласия Джини и хи-квадрат критерия. Сглаженный критерий Джини менее чувствителен к числу примеров в тестовой выборке. Таким образом, его применение приводит к уменьшению вероятности ошибок второго рода, обусловленных ограниченным числом опытов. Представлена сравнительная таблица вероятности ошибок принятия решений по хи-квадрат критерию и критерию Джини для сглаженных данных. В отличие от критерия хи-квадрат, критерий Джини оказывается работоспособен даже на выборке из малого количества опытов. Таким образом, для задач биометрии мы наблюдаем очевидный выигрыш от применения критерия Джини.

Ключевые слова: биометрия, обучение, закон распределения, статистика, вероятность, гистограмма, критерий согласия.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 146–150

BIOMETRIC STATS: SMOOTHING HISTOGRAMS BASED ON SMALL TRAINING SAMPLE

N. I. Serikova[1], A. I. Ivanov[2], S. V. Kachalin[1]

[1]Penza State University
40, Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation
E-mail: cnit@pnzgu.ru
[2]Penza research Electrotechnical Institute
9, Sovetskaya St., Penza, 440000, Russian Federation
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

The question of improving the stability of statistical calculations with small training set by complications statistical processing raw data. It is shown that the accuracy of the estimation of the distribution law of small samples of biometric data can be increased by smoothing the histogram. It is proposed to use some digital filter, which will be smoothed traditional histograms, and due to this additional processing will improve the stability of the statistical calculations. The correct choice of the window digital anti-aliasing filter and multiple artificial increase in the number of discrete, used in digital filtering allows to significantly increase the power of goodness of fit test Gini and chi-square test. Graduated Gini goodness of fit test Gini is less sensitive to the number of examples in the test sample. Thus, its use leads to a decrease in error probability of the second kind, due to the limited number of experiments. The article presents a comparative table of the error probability of decision-making by the chi-square test and the Gini for the smoothed data. In contrast to the chi-square test, the Gini criterion is functional even on a sample of small kolichistvo experiments. Thus, for the problems we are seeing biometrics obvious benefit from the application of the criterion of Gini.

Keywords: biometrics, training, distribution law, statistics, probability, histogram, goodness of fit test.

Нейросетевые преобразователи биометрия–код приходится обучать на выборке из 20–30 примеров образа «Свой», если обучение ведется по стандартному алгоритму [1–3]. Как правило, потребитель неохотно воспроизводит примеры своего биометрического образа. Люди способны обучаться распознаванию образов (и в том числе биометрических образов) на трех-пяти примерах. По этой причине пользователи ожидают от биометрического искусственного интеллекта способности обучаться на меньшем числе примеров [4–6].

В связи с этим возникает задача сократить число примеров биометрического образа «Свой» в обучающей выборке за счет усложнения статистической обработки исходных данных. К сожалению, специальным математическим приемам, позволяющим повысить устойчивость статистических расчетов, уделялось недостаточно внимания. Так, при оценке гипотезы по критерию согласия Джини или критерию согласия хи-квадрат [7–9] желательно выбирать как можно более высокий показатель числа степеней свободы (желательно увеличивать число столбиков гистограммы). Однако при этом быстро растет размер выборки, на которой строятся критерии. Возникает противоречие между желанием выбирать как можно большее число степеней свободы статистических критериев согласия и ограниченным размером исходных биометрических данных.

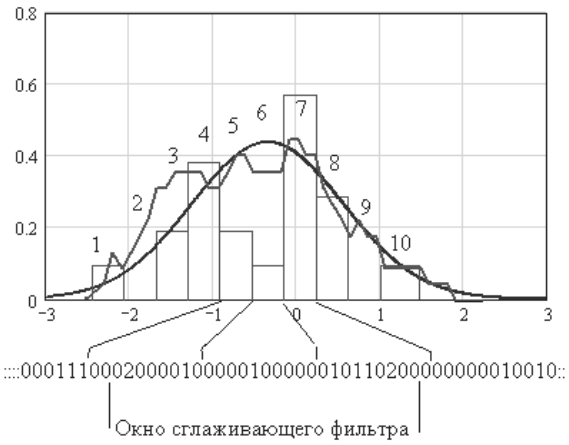
В связи с этим противоречием возникает задача расчета и использования некоторого цифрового фильтра, который будет осуществлять сглаживание традиционной гистограммы, и за счет этой дополнительной обработки улучшится устойчивость статистических вычислений.

Классические гистограммы обычно строятся исходя из того, что в каждом столбике находится от 2 до 5 зафиксированных в опыте результатов. Так, если мы имеем выборку $x_1 \le x_2 \le x_3 \le$, …, $\le x_{21}$ из 21 примера упорядоченных по возрастанию данных, то, рассчитывая на среднее число в 2 попадания в каждый столбик классической гистограммы, мы должны выбрать ширину столбиков по формуле

$$\Delta x = \frac{x_{21} - x_1}{10} = \frac{\max(x) - \min(x)}{10}. \qquad (1)$$

Пример реализации такой гистограммы, состоящей из 10 столбиков, приведен на рисунке (данные получены от генератора нормального шума с единичной дисперсией и нулевым математическим ожиданием). Из рисунка видно, что 2-й и 9-й столбики классической гистограммы оказались пустыми (данные в них вообще не попали). Максимальный скачок наблюдается между 6-м и 7-м столбиками классической гистограммы, он составляет 0,51.

Фактически столь значительные колебания данных гистограммы обусловлены тем, что использовалась достаточно малая выборка исходных данных и применена очень грубая их обработка путем простого подсчета числа попаданий в заданные интервалы. Усложним предварительную обработку данных, разбив каждый из интервалов Δx на 10 меньших интервалов $0{,}1 \cdot \Delta x$. Всего получится 100 микроинтервалов внутри динамического диапазона входных данных. Кроме того, мы можем добавить справа и слева от обнаруженного динамического диапазона изменения данных по 100 интервалов.



Классическая гистограмма и сглаженная гистограмма, полученная цифровым фильтром с нулевыми фазовыми искажениями

В итоге получается 300 микроинтервалов, на которых будет работать цифровой фильтр, сглаживающий исходные данные. Далее будем заполнять исходные данные по тому же правилу, по которому строятся классические гистограммы. Если в микроинтервал отсчетов не попало, то вводится состояние «0». Если в тот или иной микроинтервал попадают реальные данные 1, 2, 3... раза, то в этих интервалах должны появиться состояния «1», «2», «3» и т. д. В итоге появляется цифровая последовательность, пример которой приведен в нижней части рисунка.

Для осуществления цифрового сглаживания данных необходимо выбрать некоторое нечетное окно цифрового сглаживающего фильтра (на рисунке выбранная ширина окна составляет 27 микродискрет). На выбранной ширине скользящего окна может быть построен любой сглаживающий колебания низкочастотный цифровой фильтр. В частности, может быть использован фильтр простого усреднения (прямоугольное окно) с подстановкой результата в центр окна. В нашем случае для ширины окна 27 отсчетов, длины кодовой последовательности в 300 микродискрет кодовая последовательность z_1, z_2, ..., z_i, ..., z_{200} сглаживается простым усреднением:

$$y_{i+14} = \frac{1}{27}\sum_{j=1}^{27} z_{i+j}. \qquad (2)$$

Пример сглаженной гистограммы представлен на рисунке. Колебания данных сглаженной гистограммы намного меньше, чем скачки у классической гистограммы. Именно этот эффект и должен приводить к росту устойчивости статистических оценок по критерию

подобия Джини и по критерию правдоподобия хи-квадрат. Наиболее просто оценивается выигрыш в стабильности статистических вычислений по критерию Джини. Этот критерий удобен тем, что вероятность подобия экспериментального распределения данных и гипотетического близка к половине показателя Джини:

$$P_0 \approx 1 - \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty} \left| p(x) - \tilde{p}(x) \right| dx, \qquad (3)$$

где P_0 – вероятность того, что теоретическое распределение $p(x)$ и экспериментальное распределение $\tilde{p}(x)$ совпадают.

Интеграл в выражении (3) является критерием Джини, он очень чувствителен к числу столбцов гистограммы и объему выборки исходных данных. Ошибка дискретизации данных при вычислении критерия Джини может быть оценена по максимальному отклонению шума дискретизации от ожидаемой кривой распределения значений $p(x)$. На рисунке ожидаемой теоретической плотностью является нормальный закон. Классическая гистограмма дает максимальное значение ошибки отклонения 0,25, сглаживание данных гистограммы снижает максимальную ошибку до 0,15. Мы получаем примерно 40%-ное снижение ошибок квантования за счет увеличения в 10 раз числа квантовых интервалов и сглаживания данных цифровым фильтром. Если говорить в терминах вероятности проверки статистических гипотез, то примерно на 40 % возросла мощность критерия Джини и уровень доверия в оценке вероятности (3).

Очевидно, что после сглаживания гистограммы исходных данных должны возрастать и мощности других широко используемых на практике статистических критериев проверки гипотез. Однако для оценки достижимых улучшений необходимо проводить специальные численные эксперименты. Предположительно в ближайшее время будет проведен численный эксперимент по влиянию цифрового сглаживания гистограмм на широко используемый в биометрии критерий хи-квадрат проверки статистических гипотез.

Описанная выше процедура сглаживания исходных данных цифровым усредняющим фильтром является незначительным программным усложнением обработки данных. Очевидно, что выполнять подобное сглаживание исходных данных в конце XIX в. и в начале XX в. технологически было сложно из-за отсутствия программируемой вычислительной техники. В конце XX века описанные выше процедуры уже могли быть реализованы при программной обработке экспериментальных данных.

При реализации программной обработки биометрических данных применение простейшего сглаживающего фильтра (2) приводит к незначительному усложнению программ (добавляется несколько строк кода), дающему ощутимый рост доверия к статистическим оценкам. Для того чтобы реализовывать программную фильтрацию, необходимо задать число столбцов классической гистограммы (ширину столбика Δx), коэффициент увеличения числа дискрет и оптимальную ширину окна усредняющего фильтра. Фактически необходимо иметь решение оптимизационной задачи по выбору ширины окна сглаживающего фильтра при разном числе столбцов классической гистограммы и разном числе внутренних дискрет каждого столбца.

Предварительные расчеты показали, что ширина окна сглаживающего цифрового фильтра сильно зависит от числа биометрических данных в исследуемой выборке. Результаты оптимизационного моделирования сведены в табл. 1, построенную для 10 столбцов классической гистограммы и 10-кратном увеличении числа квантов при цифровом сглаживании.

Очевидно, что масштабное увеличение числа дополнительных дискрет будет приводить к пропорциональному росту длины окна сглаживающего цифрового фильтра. Изменение числа столбиков классической гистограммы также связано линейно с оптимальной длиной окна сглаживающего фильтра.

Таблица 1

Связь длины окна сглаживающего цифрового фильтра с размерами обучающей выборки

Число примеров в выборке	12	16	20	24	28	32	36	40
Ширина окна усреднения	83	71	61	53	49	45	41	39
Число примеров в выборке	44	48	52	56	60	64	68	72
Ширина окна усреднения	37	35	33	31	29	27	27	25

Таким образом, табл. 1 может рассматриваться как универсальная. Ее данные легко пересчитываются на любое число столбцов классической гистограммы и любое число дискрет дополнительного разбиения данных перед их сглаживанием. Вместо равномерного взвешивания может быть использована более сложная взвешивающая функция цифровой свертки. При этом оптимальная ширина окна будет описываться другой таблицей. При необходимости для каждой взвешивающей функции цифрового сглаживания может быть построена соответствующая таблица оптимальных значений скользящего окна.

Следует подчеркнуть, что сегодня на практике наиболее часто используют хи-квадрат критерий проверки статистических гипотез. При использовании этого критерия число столбцов гистограммы выбирают так, чтобы в среднем на каждый столбец гистограммы приходилось по 5 опытов [10]. Если придерживаться этой рекомендации, то применение хи-квадрат критерия на малых тестовых выборках приводит к появлению ошибок принятия решений с вероятностью второго рода (табл. 2).

Таблица 2

Вероятности ошибок принятия решений по хи-квадрат критерию и критерию Джини для сглаженных данных

Число опытов	8	12	16	20	24	32	48	64
Квантиль доверия P_1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$P_2(\chi^2)$	–	–	–	0,46	0,32	0,20	0,17	0,13
$P_2(Dg)$	0,41	0,35	0,25	0,19	0,17	0,11	0,06	0,04

Сглаженный критерий Джини менее чувствителен к числу примеров в тестовой выборке, по этой причине его применение приводит к меньшим значениям вероятности ошибок второго рода, обусловленных ограниченным числом опытов.

Табл. 2 строилась исходя из доверительной вероятности $P_1 = 0{,}1$ к принимаемому решению, далее использовался критерий хи-квадрат и критерий Джини с 10-кратным увеличением числа столбцов гистограммы и окном сглаживания в 11 отсчетов. Проверка велась на равномерном законе распределения, поверялась гипотеза нормальности закона распределения.

Из табл. 2 видно, что классический хи-квадрат критерий не работает, если выполнить условие попадания в среднем 5 опытов в каждый столбец гистограммы. Происходит это из-за необходимости выбора числа степеней свободы хи-квадрат критерия на 3 единицы меньше, чем число столбцов гистограммы. Фактически хи-квадрат критерий начинает работать при 20 опытах с вероятностью ошибки второго рода 0,46. С такой вероятностью равномерный закон распределения ошибочно принимается за нормальный закон.

Иная ситуация наблюдается для критерия Джини. Этот критерий оказывается работоспособен даже на выборке из 8 опытов. Вероятность ошибки второго рода для критерия Джини оказывается ниже, чем для классического хи-квадрат критерия при любом размере выборки реальных данных. Для задач биометрии мы наблюдаем очевидный выигрыш от применения критерия Джини. Табл. 2 демонстрирует эффективность применения одномерного критерия Джини $Dg(x)$.

Биометрии приходится иметь дело с множеством сильно зависимых биометрических параметров. Так, среда моделирования «БиоНейроАвтограф» [11] учитывает 416 биометрических параметров. Это означает, что от одномерного варианта критерия Джини необходимо перейти к его многомерному варианту $Dg(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{416})$. Построить одну 416-мерную функцию обобщенного критерия Джини не удается. В этом плане следует использовать опыт создания сетей максимального правдоподобия Байеса [12]. Обычно сети Байеса (вероятностные рассуждения) легко реализуемы для 3–9 учитываемых параметров. В частности, Хайкиным [13] было показано, что решения Байеса легко формализуются квадратичными формами, содержащими обратную ковариационную матрицу. Именно проблемы обращения ковариационных матриц при малом числе исходных данных являются сдерживающим фактором.

Предположительно, что синтез обобщенного критерия Джини столкнется с теми же проблемами, что и синтез высокоразмерных сетей наибольшего правдоподобия Байеса [12; 13]. Предполагается решить проблему объединением частных критериев Джини, имеющих размерность от 3 до 9, обобщающим правилом Хэмминга. Возникающие при этом сверхмалые вероятности появления ошибок второго рода предполагается учитывать по методике ГОСТ Р 52633.3–2011 [14] с учетом влияния коэффициента равной коррелированности выходных состояний частных решений [15].

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 52633.0–2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. М. : Стандартинформ. 2007. 24 с.
2. ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия – код доступа. М. : Стандартинформ, 2012. 20 с.
3. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / В. И. Волчихин [и др.]. М. : Радиотехника, 2012. 160 с.
4. Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А. Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации : монография. Пенза : Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2005. 273 с.
5. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа : монография / Б. С. Ахметов [и др.]. Алматы : ТОО «Издательство LEM», 2014. 144 с.
6. Biometric Technology in Securing the Internet Using Large Neural Network Technology / B. Akhmetov, [et al.] // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2013, Iss. 79. P. 129–138, pISSN 2010-376X, eISSN 2010-3778. URL: www.waset.org.
7. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
8. Крамер Г. Математические методы статистики. М. : Мир, 1975. 516 с.
9. Уилкс С. С. Математическая статистика. М. : Наука, 1967. 632 с.
10. Денисов В. И., Лемешко Б. Ю., Постовалов С. Н. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим : метод.

рекомендации. Ч. I. Критерии типа χ2. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1998. 126 с.

11. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф» : архив с программным обеспечением размещен на сайте ОАО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт» [Электронный ресурс]. URL: http://пниэи.рф/activity/science/noc.htm.

12. Стюард Рассел, Питер Норвиг. Искусственный интеллект. Современный подход. М.; СПб.; Киев : Вильямс, 2006. 1407 с.

13. Саймон Хайкин. Нейронные сети. Полный курс. М.; СПб.; Киев : Вильямс, 2006. 1103 с.

14. ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. М. : Стандартинформ, 2011. 16 с.

15. Оценка рисков высоконадежной биометрии : монография / Б. С. Ахметов [и др.]. Алматы : Из-во КазНТУ им. К. И. Сатпаева, 2014. 108 с.

References

1. *GOST R 52633.0–2006 Zashhita informacii. Tehnika zashhity informacii. Trebovanija k sredstvam vysokonadezhnoy biometricheskoy autentifikacii.* [Information protection. Information protection technology. Requirements for means of highly reliable biometric authentication]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 24 p.

2. *GOST R 52633.5–2011. Zashhita informacii. Tehnika zashhity informacii. Avtomaticheskoe obuchenie nejrosetevyh preobrazovatelej biometrija-kod dostupa*. [Information protection. Information protection technology. The neural net biometry-code convertor automatic training]. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 20 p.

3. Volchihin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Nazarov I. G, Yazov Y. K. *Nejrosetevaya zashhita personalnyh biometricheskix dannyh.* [Neural network protection of personal biometric data]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, 160 p.

4. Volchihin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. *Bystrye algoritmy obucheniya nejrosetevyh mehanizmov biometriko-kriptograficheskoj zashhity informacii.* [Fast learning algorithms of neural network tools biometriko-cryptographic information security]. The Monograph. Penza, Penza State University Publ., 2005, 273 p.

5. Akhmetov B. S., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Bezyaev A. V., Malygina E. A. *Tekhnologiya ispol'zovaniya bol'shikh neyronnykh setey dlya preobrazovaniya nechetkikh biometricheskikh dannykh v kod klyucha dostupa.*[The technology of using large neural networks to convert the fuzzy biometric data in the key code access]. Kazakhstan, Almaty, TOO “Izdatel'stvo LEM” Publ., 2014, 144 p.

6. Akhmetov B., Doszhanova A., Ivanov A., Kartbaev T. and Malygin A. Biometric Technology in Securing the Internet Using Large Neural Network Technology. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. July, 2013, Issue 79, p. 129–138.

7. Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya inzhenerov i nauchnyh rabotnikov.* [Applied mathematical statistics for engineers and scientists]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 816 p.

8. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki.* [Mathematical methods of statistics]. Moscow, Mir Publ, 1975, 516 p.

9. Uilks S. S. *Matematicheskaya statistika*. [Mathematical statistics]. Moscow, Nauka Publ, 1967, 632 p.

10. Denisov V. I., Lemeshko B. Yu., Postovalov S. N. *Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytnogo raspredeleniya s teoreticheskim. Metodicheskie rekomendatsii. Chast' I. Kriterii tipa χ2.* [Applied statistics. Validation rules experienced distribution agreement with the theoretical. Guidelines. Part I. Criteria type χ2]. Novosibirsk, NGTU Publ, 1998, 126 p.

11. *Sreda modelirovaniya “BioNeyroAvtograf” : arkhiv s programmnym obespecheniyem razmeshchen na sayte OAO “Penzenskiy nauchno-issledovatel'skiy elektrotekhnicheskiy institut”* [The modeling environment “BioNeyroAvtograf”. Developed by “Penza research Electrotechnical Institute”]. (In Russ.) Available at: http://пниэи.рф/activity/science/noc.htm.

12. Styuard Rassel, Piter Norvig *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod.* [Artificial Intelligence. The modern approach]. Moscow, St. Petersburg, Kiev, 2006, Vil'yams Publ, 1407p.

13. Saymon Khaykin. *Neyronnye seti. Polnyy kurs.* [Neural networks. Full course]. Moscow, St. Petersburg, Kiev, 2006, Vil'yams Publ, 1103p.

14. *ГОСТ Р 52633.3–2011. Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora*. [Information protection. Information protection technology. The high reliability biometric protection means endurance testing from matching attacks]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 16 p.

15. Akhmetov B. S., Nadeev D. N., Funtikov V. A., Ivanov A. I., Malygin A. Yu. *Otsenka riskov vysokonadezhnoy biometrii.* [Risk assessment of highly reliable biometrics]. Kazakhstan, Almaty, KazNTU im. Satpaeva Publ., 2014, 108 p.

© Серикова Н. И., Иванов А. И., Качалин С. В., 2014

УДК 550.34.01

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 151–156

РАСЧЕТ ГОДОГРАФА ТЫВЫ НА ОСНОВЕ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

Т. А. Тушко

Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
E-mail: TTushko@sfu-kras.ru

Представлены результаты расчета годографа первых вступлений P-волн для района Тывы на основе скоростной модели среды, полученной ранее исходя из данных сейсмической изученности Алтае-Саянской складчатой области. Приведено краткое описание блоково-слоистой модели земной коры и верхней мантии юга Красноярского края и Тывы. Рассмотрены ключевые формулы, лежащие в основе алгоритма расчета сейсмических лучей от приповерхностных и заглубленных источников в среде с линейной зависимостью скорости от глубины. Дан анализ волновой картины в предложенной модели среды. Приведено сравнение полученного годографа с экспериментальными данными и годографом, применяемым в регионе для обработки сейсмологических данных. Рассмотрен способ внесения станционных поправок к годографу, учитывающих влияние низкоскоростных отложений под сейсмостанцией.

Ключевые слова: скоростная модель среды, годограф, сейсмический луч, рефрагированная волна, головная волна, гипоцентр, станционная поправка.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 151–156

CALCULATION OF THE HODOGRAPH FOR TIVA REGION ON THE BASIS OF VELOCITY MODEL OF MEDIA

T. A. Tushko

Institute of space and information technology of Siberian Federal University
26, Kirenskogo St., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: TTushko@sfu-kras.ru

The development of seismic network in Krasnoyarsk region and Tiva republic arouse the interest to earth crust structure model for local earthquake data processing. The seismic waves travel time hodograph as 1-dimensional model of media structure is widely used in seismological practice. In the present paper the results of calculation of the first arrival times of P-wave hodograph for Tiva region are presented. Calculations are based on the block-layered velocity model of media obtained earlier as a result of seismic research of Altay-Sayan folded area data. A brief description of earth crust and upper mantle velocity model for south part of Krasnoyarsk region and Tiva republic is given. The structure of Tiva block is supposed to be 3-layered with horizontal boundaries. Consolidated part of the earth crust is characterized by linear dependence of wave velocity on depth. Values of model parameters were obtained by averaging of DSS and CWME velocity curves. Analysis of the wave pattern in the framework of the media model is carried out. In the paper an algorithm to calculate of seismic rays from sources positioned in different depths within the earth crust is discussed. The algorithm is based on analytical solutions derived from the general formulation of the direct kinematic problem of seismology in the ray approximation. The refracted and head waves propagation in the environment model is considered. Resulted hodograph is compared to that applied recently to regional seismic data. Comparison of head wave hodograph allowed to reveal a systematic error due to a difference in the earth crust thickness. Comparison of refracted P-wave hodograph with experimental travel time catalogue from industrial explosion shows a good agreement. A way to insert station corrections into hodograph originated from low velocity sediments under the seismic stations is proposed. Obtained hodograph is offered to use in hypocenter location problems.

Keywords: velocity model of media, hodograph, seismic ray, refracted wave, head wave, hypocenter, stations correction.

Введение. В связи с развитием сети сейсмических наблюдений в сейсмоактивных районах Красноярского края и Тывы возрос интерес к моделированию скоростного строения земной коры и верхней мантии с целью обработки данных от местных землетрясений. Годограф, как дискретная модель среды, является

наиболее широко используемым одномерным способом ее представления. Однако систематические различия годографов объемных волн для различных регионов, указывающие на существование разнообразных неоднородностей в земной коре и верхней мантии, заставляют сейсмологов изучать их и моделировать для получения годографов, более соответствующих реальному строению среды.

Настоящая публикация является продолжением работы [1], где предложена блоково-слоистая модель скоростного строения среды на участке Алтае-Саянской складчатой области, охватывающем южную часть Красноярского края и Тыву, а также работы [2], в которой рассмотрены математическая постановка и алгоритм решения прямой задачи в предлагаемой скоростной модели среды. В данном исследовании ставилась задача расчета годографа, под которым подразумевается зависимость времени пробега сейсмической волны от эпицентрального расстояния, и глубины источника, выражаемая графически или таблично.

На основе решения прямой задачи в принятой скоростной модели земной коры для района Тывы был рассчитан и проанализирован годограф первых вступлений продольных волн.

Исходя из того, что большинство систем обработки данных в режиме реального времени используют в своей работе годографы, а не встроенные алгоритмы решения прямой задачи, расчет годографа даст возможность применить полученную ранее скоростную модель на практике, а также выполнить сравнение ее с другими одномерными моделями и оценить адекватность реальному строению среды.

Актуальность работы обусловлена слабой изученностью района Тывы при возрастающей сейсмической активности. Работа нацелена на повышение точности решения задач обращения наблюденных данных за счет уточнения представлений о среде.

Модель среды и анализ волновой картины. Для построения скоростной модели среды в работе [1] был выбран участок с координатами φ = 49,5°–56,5°*N* и λ = 87°–99°*E*, включающий наиболее сейсмоактивную часть Красноярского края и Тыву. В работе приводится подробный анализ исходного экспериментального материала, полученного методами МОВЗ и ГСЗ, дано обоснование выбора типа модели, изложена методика количественной оценки описывающих ее параметров. За основу была взята блоково-слоистая модель, под которой подразумевается совокупность одномерных трехслойных моделей, каждая из которых задает скоростное строение в соответствующем блоке земной коры. Заметим, что модели подобного типа активно использовались в сейсмологии и ранее [3]. Исследуемая территория была разбита на 8 блоков. Итоговая скоростная модель была представлена картой с указанием границ блоков и таблицей со значениями параметров модели. По возможностям исходной информации полученная модель среды представляется оптимальной на текущем этапе исследований.

Глубинное строение земной коры в районе Тывы представлено в исходной модели [1] блоком 8 и частично блоками 5 и 7. Для предстоящих расчетов было выполнено осреднение их параметров пропорционально площади блоков. Кроме того, учитывая, что верхний низкоскоростной слой присутствует на исследуемой территории фрагментарно, было решено учесть его влияние путем расчета поправок к годографу, исключив из модели блока.

Таким образом, упрощенная модель среды в объединенном блоке Тывы (рис. 1) является одномерной, двухслойной, с горизонтальной границей раздела, расположенной на глубине h_2 и соответствующей границе Мохо. Скорость распространения упругих волн в верхнем слое аппроксимируется линейной функцией от глубины $v(z) = v_0 + \alpha \cdot z$, где α = const, и включает в себя консолидированную часть коры. Второй слой, относящийся к верхней части мантии, характеризуется постоянной скоростью v_2. Параметры верхнего слоя h_1 и v_1 предполагается использовать для расчета станционных поправок к годографу только там, где установлено наличие низкоскоростных отложений.

Значения параметров скоростной модели среды в районе Тывы приведены в таблице.

В такой среде первое вступление продольной волны (*P*-волны) от землетрясения, зарегистрированного сейсмостанцией, может быть образовано либо рефрагированной в первом слое волной, либо головной волной от границы Мохо. Волна, отраженная от границы Мохо, не рассматривалась по ряду причин. Во-первых, на эпицентральных расстояниях от 0 до 160 км, где ее можно проследить, она приходит значительно позже рефрагированной, так как имеет более длинную траекторию. Во-вторых, для удалений более 160 км угол падения волны на границу превышает критическое значение, при котором наступает полное внутреннее отражение, и волна скользит вдоль границы. В-третьих, кратная отраженная волна значительно слабее других по амплитуде.

Ясно, что на близких эпицентральных расстояниях первой приходит рефрагированная волна. Протяженность годографа рефрагированной волны в расчетах ограничена глубиной погружения луча $\hat{z}$, она не должна превышать глубину границы Мохо Z_M, иначе луч выйдет за пределы линейного слоя. Как показали расчеты, глубина погружения лучевой траектории рефрагированной волны, зарегистрированной на удалении *D* = 360 км от источника на поверхности, составляет 49,15 км.

Расстояние выхода головной волны на дневную поверхность *D* зависит от глубины источника z_0: чем глубже расположен источник, тем меньше эпицентральное расстояние. Головная волна начинает обгонять рефрагированную лишь на значительном удалении от эпицентра. Так, для случая z_0 = 0 эпицентральное расстояние, на котором первое вступление образовано головной волной, составляет около 270 км, для глубины источника z_0 = 10 км это расстояние равно 255 км.

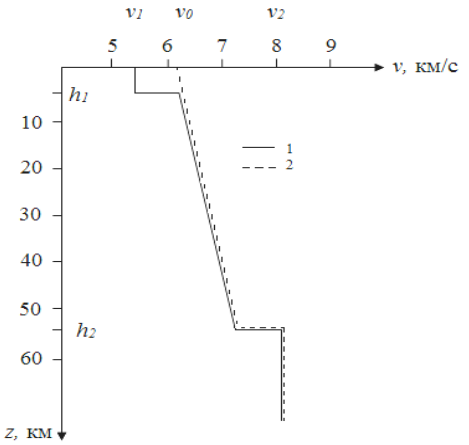


Рис. 1. Скоростная модель в блоке:
1 – базовая; *2* – упрощенная

Параметры модели

v_0	6,1
α	0,021
v_2	8,0
h_2	53
v_1	5,4
h_1	4

Алгоритм расчета годографа. Время распространения волны любого типа зависит от эпицентрального расстояния *D*, разделяющего источник и приемник, а также от положения источника по глубине z_0.

Рассмотрим волну, рефрагированную в верхнем слое. Если источник расположен на поверхности $z_0 = 0$, то решение прямой задачи в среде с линейной зависимостью скорости от глубины $v(z) = v_0 + \alpha \cdot z$ выражается формулой Герглотца–Вихерта [4; 5]

$$T_{(M_0,M)} = \frac{2}{\alpha}\ln\left(\frac{1+\sqrt{1-p^2\cdot v_0^2}}{p\cdot v_0}\right), \qquad (1)$$

где M_0 – точка расположения источника; M – точка расположения приемника; *p* – лучевой параметр, являющийся константой для данного луча и равный $p = \sin e(z)/v(z)$; *e* – угол между лучом и вертикалью в точке среды на глубине *z*.

Для случая заглубленного источника решение зависит от формы лучевой траектории, соединяющей источник и приемник. На рис. 2 схематически изображены возможные положения источника на дуге луча: M_0, M_{01}, M_{02}, M_{03}. Случай, когда источник находится в точке M_0, уже рассмотрен (1). Остальные обозначим как случаи 1, 2 и 3. Заметим, что M_{02} совпадает с точкой наибольшего погружения луча $\hat{z}$.

В первом случае решение задачи имеет вид

$$T_{(M_{01},M)} = \frac{1}{\alpha}\ln\frac{\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot v_0^2}\right)\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot\left(v_0+\alpha\cdot z_0\right)^2}\right)}{p^2\cdot v_0\cdot\left(v_0+\alpha\cdot z_0\right)}. \qquad (2)$$

Во втором случае оно является частным случаем решения (1), так как точка наибольшего погружения луча M_{02} делит лучевую траекторию пополам и время движения по ней вдвое меньше $T_{(M_{02},M)} = T_{(M_0,M)}/2$.

В третьем случае решение имеет вид

$$T_{(M_{03},M)} = \frac{1}{\alpha}\ln\frac{\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot v_0^2}\right)\left(v_0+\alpha\cdot z_0\right)}{v_0\cdot\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot\left(v_0+\alpha\cdot z_0\right)^2}\right)}. \qquad (3)$$

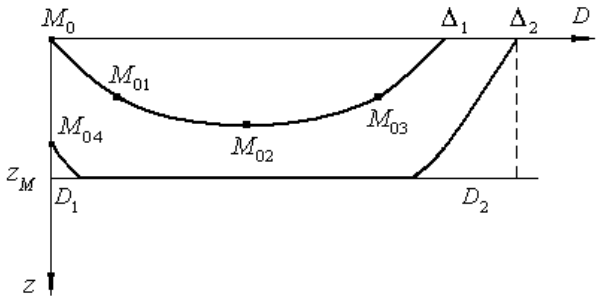


Рис. 2. Лучевые траектории: M_0, M_{01}, M_{02}, M_{03} – возможные положения источника рефрагированной волны; M_{04} – источник головной волны; Δ_1, Δ_2 – положения приемника; Z_M – граница Мохо

В работе [2] предложен критерий, позволяющий однозначно идентифицировать форму лучевой траектории, соединяющей источник с приемником для заданных *D* и z_0, и тем самым правильно применить формулы (1)–(3) в расчетах. Оценка лучевого параметра *p*, присутствующего в формулах, также зависит от типа траектории и является отдельной задачей, рассмотренной в работе [2]. Отметим, что решения (2) и (3) для заглубленного источника в явном виде в литературе не приводятся, их подробный вывод дан в работе [2].

Время распространения головной волны, которая схематически изображена на рис. 2 как траектория (M_{04}, Δ_2), рассчитывается как сумма времен движения

волны до границы T_1, вдоль границы Мохо T_3 и от границы до приемника T_2:

$$T_1 = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot(v_0+\alpha\cdot z_0)^2}\right)\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)}{(v_0+\alpha\cdot z_0)\cdot\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)^2}\right)}, \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot v_0^2}\right)\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)}{v_0\cdot\left(1+\sqrt{1-p^2\cdot(v_0+\alpha\cdot z_M)^2}\right)}, \quad (5)$$

где z_M – глубина до границы Мохо, вдоль которой происходит скольжение луча, образующее головную волну. Значение лучевого параметра в этом случае равно $p = 1/v_2$.

Время движения волны вдоль границы равно

$$T_3 = (D - D_1 - D_2)/v_2,$$

где D – эпицентральное расстояние между источником и приемником; D_1 – расстояние по горизонтали, пройденное лучом до падения на границу; D_2 – расстояние по горизонтали, пройденное лучом от границы до приемника.

Значения D_1 и D_2 ищутся также на основе известного решения для траектории [5]:

$$x_{(M_x,M_y)} = \int_{z_x}^{z_y} \frac{p\cdot v(z)\cdot dz}{\sqrt{1-p^2\cdot v^2(z)}}, \quad (6)$$

где M_x, M_y – точки среды; $x_{(M_x,M_y)}$ – расстояние между этими точками по горизонтали; z_x и z_y – глубина расположения этих точек.

Подчеркнем, что изложенный алгоритм расчета времен пробега волн не является численным, в отличие от алгоритмов, основанных на трассировании лучей. Поэтому его хорошо использовать в обратных задачах, требующих многократного вычисления прямой задачи, поскольку он основан на аналитических решениях, обладающих устойчивостью и не дающих большой погрешности в вычислениях.

Сравнение годографов. С целью оценки скоростной модели среды и рассчитанного по ней годографа было выполнено сравнение результатов расчетов с применяемыми в сейсмологической практике каталогами (годографами) времен пробега волн, а также с экспериментально полученными каталогами от промышленного взрыва на юге Красноярского края. Материалы для сравнения были предоставлены Центром сейсмического мониторинга ГПКК «КНИИГиМС» в г. Красноярске.

Таким образом, в работе рассматривались:

1. Годографы рефрагированной $T_{реф}$ и головной $T_{гол}$ P-волн, рассчитанные автором на основе описанной выше модели от источников на глубине 0, 10, 20, 30 км и для интервала удалений от 0 до 500 км с шагом 5 км.

2. Годографы P_g и P_n, применяемые в настоящее время в Красноярском крае для локации землетрясений. Согласно принятым в сейсмологии обозначениям, P_g – это годограф P-волн, наблюдаемых в первых вступлениях от близких и местных землетрясений, P_n – это годограф объемных волн, распространяющихся вдоль границы Мохо. Эти годографы были рассчитаны С. И. Голенецким [6] для условий Байкальского региона.

3. Каталог времен пробега P-волн, полученный от искусственного источника и прослеживаемый на удалениях от 0 до 130 км. Далее в тексте он будет называться $T_{э1}$ и $T_{э2}$ – соответственно ветвям экспериментального годографа.

4. Годограф Джеффриса–Буллена для осредненной модели Земли с шагом 0,5 °.

Рассмотрим случай, когда источник расположен на глубине $z_0 = 0$.

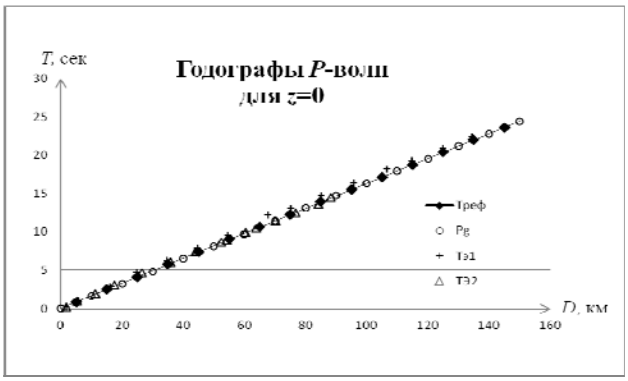


Рис. 3. Сравнение годографов от источника на глубине $z = 0$ км

На эпицентральных расстояниях от 0 до 150 км (рис. 3) наблюдается хорошее совпадение годографа рефрагированной волны $T_{реф}$ и годографа P_g. Расхождение в отдельных точках годографов $T_{реф}$ и P_g не превышает 0,05 с. Причем от 0 до 75 км $T_{реф}$ идет чуть выше P_g, а затем наоборот. Одна из ветвей экспериментального годографа $T_{э2}$, наблюдаемая на расстояниях от 0 до 80 км, также очень хорошо согласуется с расчетным. Это указывает, прежде всего, на кинематическую эквивалентность моделей среды и их адекватность реальному строению до глубины примерно 10 км.

На эпицентральных расстояниях более 150 км расхождение между $T_{реф}$ и P_g начинает нарастать и к 250 км достигает 0,8 с. На расстояниях от 210 км и далее годограф рефрагированной волны $T_{реф}$ лежит ниже годографа P_g.

Годограф $T_{гол}$ головной волны от границы Мохо, выходящей на поверхность на $D > 160$ км, лежит выше годографа P_n на 1,65 с на всем протяжении. Последнее можно объяснить более глубоким залеганием границы Мохо в южной части Алтае-Саянской складчатой области примерно на 5–7 км по сравнению с Байкальским регионом, для которого и рассчитывался годограф P_n.

Следует отметить хорошее совпадение годографа P_n с годографом Джеффриса–Буллена, особенно на больших эпицентральных расстояниях, что указывает на подобие скоростных моделей среды, лежащих в их основе.

Для заглубленных источников картина несколько сложней. На рис. 4 приведены годографы от источника, расположенного на глубине z_0 = 10 км.

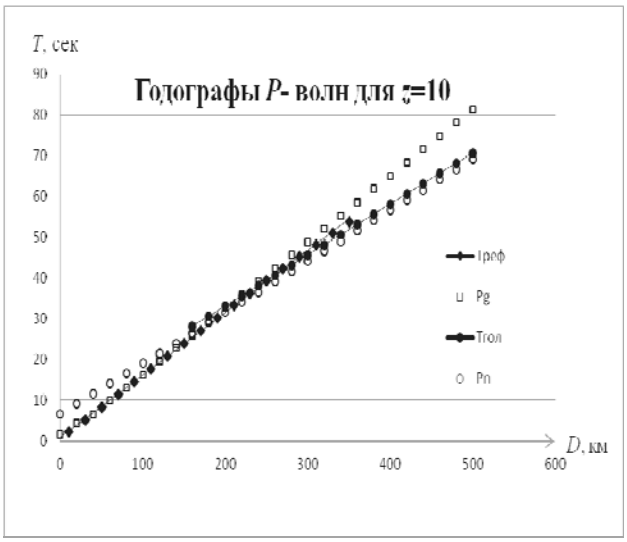


Рис. 4. Сравнение годографов от источника на глубине z = 10 км

Здесь также можно отметить хорошее совпадение на близких расстояниях годографа рефрагированной волны $T_{реф}$ и годографа P_g. На эпицентральных расстояниях от 30 до 130 км разница во временах вступления составляет менее 0,1 с, далее до 200 км – не превосходит 0,8 с. На расстоянии 350 км она уже составляет 3,1 с. Это говорит о разной природе волн, учитываемых при составлении сравниваемых годографов. На очень близких расстояниях от 0 до 30 км расхождение (до 0,6 с в отдельных точках) может быть объяснено разницей как в моделях, так и в алгоритмах расчета волн. Заметим, что эта разница имеет тот же порядок, что и возможная станционная поправка.

Годограф головной волны $T_{гол}$ лежит выше годографа P_n на 1,59 с, что вполне соответствует разнице в залегании границы Мохо, составляющей около 7 км.

Расчет станционных поправок. Если под станцией, зарегистрировавшей волну, есть осадочный низкоскоростной слой, то для нее можно рассчитать поправку, учитывающую эту особенность, не включенную в базовую модель среды. Поправка будет прибавляться к значению времени, снятого с годографа.

Пусть толщина осадков под станцией характеризуется мощностью h_1 и скоростью распространения в них упругих волн v_1. Мы можем найти угол луча с вертикалью e, под которым волна проходит указанный слой: $\cos e = \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}$, где p – лучевой параметр:

$$p = 2 \Big/ \sqrt{4 \cdot v_0^2 + (D \cdot \alpha + \frac{z_0}{D} \cdot (2 \cdot v_0 + \alpha \cdot z_0))^2}\,.$$

Аппроксимируя траекторию луча в слое отрезком прямой длины $h_1 / \cos e$, рассчитаем значение станционной поправки по формуле:

$$DT = \frac{h_1 \cdot (v_0 - v_1)}{v_0 \cdot v_1 \cdot \cos e}. \qquad (7)$$

В случаях, когда эпицентральное расстояние $D = 0$, луч направлен вертикально и $\cos e = 1$, формула (7) еще более упрощается. Если известно превышение станции над уровнем моря $h_{ст}$, можно учесть и его влияние, прибавив $h_{ст} / (v_1 \cdot \cos e)$ к DT.

Ясно, что в фиксированной модели среды поправка к годографу головной волны будет зависеть только от параметров осадочного слоя под конкретной станцией, поскольку угол подхода луча в этом случае не зависит от эпицентрального расстояния и глубины источника. Так, при h_1 = 5 км и v_1 = 5,4 км/с значение поправки составит менее 0,16 с.

Поправки же к годографу рефрагированной волны будут зависеть от всех параметров задачи. На рис. 5 приведены результаты расчета поправок к годографу рефрагированной волны как функции эпицентрального расстояния. Параметры среды в расчетах соответствуют таблице; глубина источника в первом случае равна 0, во втором случае – 10 км.

Для глубины z = 0 график начинается от 100 км. Это сделано неслучайно, так как для малых эпицентральных расстояний глубина погружения луча не превысит 4 км, что в данном случае менее толщины h_1 низкоскоростного слоя. Поэтому в случае малых эпицентральных расстояний и приповерхностного источника нужен другой алгоритм расчета поправок, основывающийся на более точных данных о строении верхней части разреза и учитывающий прямую волну, если источник находится в пределах того же низкоскоростного слоя.

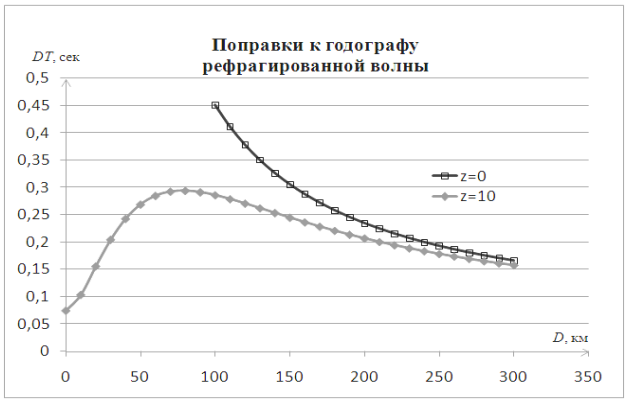


Рис. 5. Поправки к годографу от источников на глубине z = 0 и z = 10 км

Если источник заглублен более чем на 5 км, то поправка к годографу рефрагированной волны вначале растет, затем уменьшается обратно пропорционально

изменению угла подхода луча к границе низкоскоростного слоя, что и наблюдается на рис. 5, кривая $z = 10$ км.

Отметим, что в пределах рассматриваемой в работе площади, несколько превышающей административные границы Тывы, из десяти нанесенных на карту сейсмостанций, низкоскоростные отложения установлены только под станциями Кызыл (5 км), Тоджа (8 км), Чадан (5 км). Для каждой из них можно рассчитать и поставить в соответствие таблицы поправок к годографу в зависимости от удаленности и глубины гипоцентра.

Заключение. В работе дано описание скоростной модели среды и приведены основные расчетные формулы для решения прямой задачи в представленной модели.

Выполнен расчет годографа первых вступлений продольных волн для Тывы от источников на глубине 0, 10, 20, 30 км и для удалений от 0 до 500 км с шагом 5 км.

Изложена методика расчета станционных поправок, учитывающих строение среды под сейсмостанцией, проанализированы их возможные значения.

Дано сравнение полученного годографа с применяемым в регионе. Сравнение показало достаточно хорошее совпадение экспериментального годографа от промвзрыва и годографа P_g с годографом, рассчитанным автором на эпицентральных удалениях от 0 до 200 км, что подтверждает пригодность последнего к использованию для задач локации местных землетрясений. Сравнение годографа головной волны от границы Мохо с годографом P_n показывает, что последний содержит систематическую ошибку, связанную с разницей в глубине залегания границы Мохо для районов Тывы и Байкала, что делает предпочтительным использование годографа головной волны, рассчитанного автором.

Скоростная модель, на основе которой был рассчитан годограф, представляется оптимальной по возможностям исходной информации на данном этапе исследований, а полученные результаты дают основание считать скоростную модель строения среды достаточно конструктивной и заслуживающей дальнейшего развития.

Библиографические ссылки

1. Тушко Т. А., Осеев В. Г., Пилимонкин Н. С. Построение скоростной модели среды для решения задач гипоцентрии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : материалы V Междунар. сейсмологической школы. Обнинск : ГС РАН. 2010. С. 209–214.

2. Тушко Т. А. Алгоритм расчета годографа для среды, содержащей слой с линейной зависимостью скорости от глубины // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4(37). С. 97–101.

3. Кондорская Н. В., Тушко Т. А. Блоково-слоистая модель земной коры и определение гипоцентров землетрясений Каспийского моря // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1993. № 5. С. 17–23.

4. Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М. : ГИТТЛ, 1955.

5. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х т. М. : Мир, 1983. 872с.

6. Голенецкий С. И. Землетрясения в Иркутске. Иркутск, 1997.

References

1. Tushko T. A., Oseev V. G., Pilimonkin N. S. [Construction of velocity model for hypocenter location problem]. *Sovremennie metodi obrabotki i interpretacii seismologicheskih dannih*. [Modern methods of processing and interpretation of seismical data. Materials of 5th International Seismological Workshop]. Obninsk, GS RAN, 2010, p. 209–214. (In Russ.)

2. Tushko T. A. [Algorithm of calculation of the hodograph for media containing a layer with a linear dependence of velocity on depth]. *Vestnik SibGAU*. 2011, vol. 37, no. 4 (37), p. 97–101. (In Russ.)

3. Kondorskaya N. V., Tushko T. A. [Block-layered model of the earth crust and Caspian sea earthquake hypocenter location]. *Izv. AN SSSR, Physics of the Earth*, no. 5, 1993, p. 17–23. (In Russ.)

4. Savarensky E. F., Kirnos D. P. *Elementi seismologii i seismometrii* [Elements of seismology and seismometry]. Moscow, GITTL Publ., 1955. (In Russ.)

5. Aki K., Richards P. Quantitative seismology: theory and methods. In 2 v. San Francisco, W. H. Freeman and company, 1983, 872 p.

6. Golenetsky S. I. *Zemletryaseniya v Irkutske*. [Earthquakes in Irkutsk]. Irkutsk, 1997.

© Тушко Т. А., 2014

УДК 004.42

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 157–161

УЛУЧШЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ

М. А. Фарков[1], А. И. Легалов[1,2]

[1]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: mihail.farkov@gmail.com
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: legalov@mail.ru

Проведён анализ существующих реализаций метода дифференциальной эволюции с использованием графических процессоров. Представлена модель вычислений, уменьшающая издержки, возникающие при вызове вычислительных ядер, за счёт объединения логически связанных этапов метода дифференциальной эволюции, имеющая проработанную структуру распределения памяти, направленную на объединение запросов к глобальной памяти графического процессора, и позволяющая эффективно использовать Compute Unified Device Architecture (CUDA) потоки для решения большого количества задач оптимизации.

Ключевые слова: графические процессоры, CUDA, дифференциальная эволюция.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 157–161

AN IMPROVEMENT OF THE DIFFERENTIAL EVOLUTION METHOD IMPLEMENTATED ON GPU

M. A. Farkov[1], A. I. Legalov[1, 2]

[1]Siberian Federal University
69, Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: mihail.farkov@gmail.com
[2]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: legalov@mail.ru

Differential evolution is a very effective numerical optimization method which applied to diverse the set of computationally intensive tasks. Due to the features of the algorithm, it is very suitable for graphics processing unit (GPU). Most of the algorithm stages can be executed independently that corresponds to the basic programming paradigm of GPU (single instruction multiple data). Besides, an algorithm has a regular memory structure for internal data. The use of GPU allows to improve the speed of the algorithm significantly. The analysis of existing implementations of differential evolution method on GPU is performed. Moreover, existing implementations of the differential evolution algorithm on GPU use several unoptimized techniques which restrict effective application of the algorithm to tasks which use multiple optimization procedures. A new computational model that improves current implementations is described. A presented model reduces kernel calls latency due to combining logically-connected kernel into a single global kernel. The algorithm allows to use computational grid which contains single computational block. This approach satisfies requirements of the differential evolution approach to size of population (from five to ten times greater than number of optimized variables) and allows to use GPU internal barrier synchronization techniques. Besides a proposed implementation has regular data allocation in the global memory of GPU that provides coalescence of requests to the slowest global memory thus all threads in warp can read and write information from global memory per single request. Moreover it allows to use Compute Unified Device Architecture (CUDA) streams in very effective manner. In fact, a proposed model can simultaneously execute as much optimization procedure as multiprocessors available on GPU and belimited only by computer capabilities restrictions.

Keywords: GPGPU, CUDA, differential evolution.

Введение. Метод дифференциальной эволюции эвристического алгоритма для выполнения глобальной оптимизации впервые был предложен в [1]. Решение задачи оптимизации некоторой целевой функции определяется набором из *NP* векторов, размерностью *D*. Каждый элемент вектора – это параметр, участвующий в процедуре оптимизации. Набор векторов называется кластером или популяцией (*V*). Начальное состояние векторов кластера определяется случайным образом в пределах пространства поиска. Алгоритм подразумевает три основные стадии: мутацию, кроссовер, выбор. Прежде всего, на каждой последующей итерации метода ($G + 1$) для каждого вектора кластера происходит формирования мутанта согласно

$$Vm_{i(G+1)} = V_{r1(G)} + F(V_{r2(G)} - V_{r3(G)}), \qquad (1)$$

где $Vm_{i(G+1)}$ – мутантный вектор для *i*-го вектора; $V_{r1(G)}$, $V_{r2(G)}$, $V_{r3(G)}$ – некоторые векторы предыдущей итерации метода, выбранные случайно; *F* – константа метода $\in$ [0,2].

После формирования мутантного вектора, с его использованием происходит формирование тестового (trial) вектора согласно

$$Vt_{ij} = \begin{cases} Vm_{ij} & rand() \le CF \\ V_{ij} & rand() > CF \end{cases}, \qquad (2)$$

где Vt_{ij} – *j*-й параметр *i*-го тестового вектора; Vm_{ij} – *j*-й параметр *i*-го мутантного вектора; V_{ij} – *j*-й параметр *i*-го вектора текущей итерации метода; *CF* – параметр метода $\in$ [0,1].

После формирования тестового вектора происходит вычисление целевой функции. Если её значение оказывается предпочтительнее, тестовый вектор замещает оригинальный вектор. Процесс выполняется итеративно для каждого вектора на каждом шаге метода.

Метод дифференциальной эволюции обладает высокой степенью параллелизма по данным, так как в пределах шага метода обработка каждого отдельного вектора является полностью независимой. Кроме того, метод имеет небольшое количество параметров. В связи с этим метод хорошо подходит для реализации с использованием массивно-параллельных архитектур, таких как графические процессоры. Существует несколько реализаций метода с использованием графических процессоров. Однако не представлено решений, достаточно полно использующих такие ресурсы графического процессора, как многопоточное исполнение вычислительных ядер, и ориентированных на параллельное решение большого количества задач оптимизации.

Существующие реализации. Первая наивная реализация метода с использованием графических процессоров представлена в [2]. В предложенном варианте каждая стадия метода дифференциальной эволюции реализуется посредством отдельного вызова вычислительного ядра. Все данные между вызовами ядер сохраняются в глобальной памяти графического процессора. Решение о прекращении процесса вычислений происходит на центральном процессоре. При этом используется одномерная сетка с большим количеством вычислительных блоков. Реализация представлена на рис. 1. В алгоритме используются следующие вычислительные ядра:

– Ядро I: первоначальная реализация кластера векторов решений метода с использованием случайно сгенерированных чисел;

– Ядро E: вычисление значения целевой функции;

– Ядро P: подготовка к выполнению мутации; определение индексов векторов, использующихся для формирования мутантных векторов;

– Ядро M: формирование мутантных векторов;

– Ядро C: выполнение кроссовера, т. е. формирование тестовых векторов;

– Ядро R: замещение в случае необходимости векторов предыдущей итерации метода соответствующими тестовыми векторами на основании вычисленного значения целевой функции.

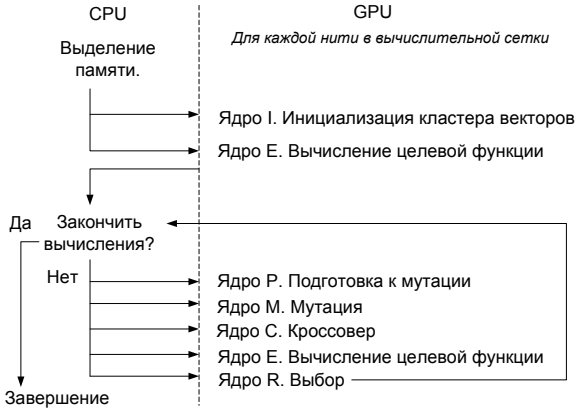


Рис. 1. Реализация метода дифференциальной эволюции на графическом процессоре

К недостаткам реализации следует отнести излишнее разделение вычислений на ядра, что не оправдано логикой метода дифференциальной эволюции, кроме того, в реализации используется предгенерация случайных чисел на центральном процессоре, что привносит дополнительные задержки, связанные с пересылкой информации между памятью центрального процессора и памятью графического процессора.

После первой реализации было представлено значительное количество работ по улучшению отдельных аспектов метода и адаптации для решения различных задач. В работах [3; 4] используется библиотека CURAND для генерации случайных чисел в процессе вычислений на графическом процессоре для исключения сложностей с генерацией случайных чисел посредством нескольких потоков центрального процессора и пересылки их в память графического процессора. Кроме того, используются возможности текстурной памяти для ускорения работы. В реализации [5] предлагается использовать предварительно сгенерированные на графическом процессоре случайные числа. Решение в целом соответствует представленным ранее. Вычислительный процесс организован

как последовательный вызов нескольких вычислительных ядер. В работе [6] графический процессор используется только для вычисления целевой функции, все остальные этапы метода дифференциальной эволюции выполняются центральным процессором. Реализация, предложенная в [7], в целом соответствует наивной версии. В вышеописанных работах делаются лишь незначительные попытки улучшить отдельные компоненты наивной реализации. Ключевыми недостатками, присутствующими во всех описанных работах, являются отсутствие динамического управления нагрузкой в зависимости от возможностей доступных графических процессоров, а также излишнее разделение логически связанных этапов метода дифференциальной эволюции на вычислительные ядра.

Более существенные изменения в оригинальный алгоритм были предложены в [8]. Авторы сократили количество вычислительных ядер путём объединения логически связанных операций метода. Таким образом, были объединены ядра I и E, а также ядра M, C, R и E (далее – ядро MCRE), что позволило более эффективно использовать разделяемую память за счёт уменьшения количества вызовов вычислительных ядер, что сказалось на производительности метода. Также авторы использовали CUDA-потоки для выполнения нескольких независимых ядер параллельно. Так, ядро, комбинированное с ядром MCRE, выполняется одновременно с ядром P. Кроме того, было добавлено автоматическое конфигурирование вычислительно сетки блоков на основании доступных ресурсов графического процессора, что является важным нововведением в свете того, что при фиксированной настройке вычислительной сетки, не согласованной с требованиями конкретной задачи, и без учёта ресурсов конкретного графического процессора нельзя правильно распределить нагрузку на мультипроцессоры, в результате чего они могут оказаться недогруженными. К существенным преимуществам метода следует отнести привнесение конфигурирования вычислений в процессе выполнения, а также тенденцию к объединению логически связанных этапов метода дифференциальной эволюции в единые вычислительные ядра. При этом следует отметить, что предложенный подход к использованию потоков не является оправданным. Генерация случайных чисел для выполнения стадии мутации метода дифференциальной эволюции не является вычислительно затратной процедурой и, как правило, не сравнима по затратам со стадией отбора, когда необходимо выполнять вычисление целевой функции для всех векторов кластера.

Таким образом, существующие реализации имеют ряд недостатков, ограничивающие вычислительный процесс. Прежде всего, в процессе функционирования алгоритма происходит большое количество вызовов вычислительных ядер, которые налагают дополнительные издержки, что является следствием другого недостатка – использования мультиблочного распределения вычислительной нагрузки. CUDA не имеет явных средств для выполнения синхронизации вычислений между блоками, поэтому для того, чтобы быть уверенным, что на очередном этапе алгоритма предыдущий этап был выполнен всеми нитями, требуется запуск вычислительных ядер и их явная синхронизация со стороны центрального процессора. Это, в свою очередь, налагает существенные ограничения на использование CUDA-потоков.

Улучшение реализации.

1. Перераспределение вычислительной нагрузки и использование нескольких CUDA-потоков. Следует отметить, что один вычислительный блок CUDA поддерживает до 1024 нитей на один вычислительный блок. Согласно рекомендации для метода дифференциальной эволюции из [1; 9; 10] следует, что оптимальный размер кластера векторов находится в пределах [5D, 10D]. Таким образом, одного вычислительного блока достаточно для покрытия задач с большим количеством оптимизируемых переменных. Кроме того, это позволяет использовать быструю, встроенную, барьерную синхронизацию в пределах одного блока [11]. Такое распределение нагрузки позволяет использовать CUDA-потоки для запуска нескольких процедур оптимизации одновременно и асинхронно, используя все возможности имеющихся мультипроцессоров на графическом процессоре [12; 13]. Это важно в случае построения программ, требующих выполнения глобальной оптимизации над большим количеством объектов, а также позволяет проще управлять вычислительной нагрузкой в процессе работы программы за счёт имеющихся в CUDA функций для асинхронной работы.

2. Объедение вычислительных ядер. Продолжая идею, предложенную в [8], также вполне возможно объединить ядро P с имеющимся основным ядром MCRE. Генерация индексов векторов для формирования мутантного вектора не является затратной процедурой, и её вынос в отдельный CUDA-поток не оправдывает вычислительные издержки, возникающие из-за вызова ядер их синхронизации, а также использования глобальной памяти для хранения информации. Таким образом, при выделении отдельного генератора случайных чисел для каждой нити можно объединить эти ядра.

3. Объединение запросов к глобальной памяти и уменьшение дивергенции варпов. Неоспоримым преимуществом метода дифференциальной эволюции в принципе, а также применительно к реализации на графическом процессоре, является регулярность структур данных, используемых методом, и небольшой объём требуемой памяти. Фактически для выполнения метода требуется только сохранять информацию о текущем значении оптимизируемого параметра для каждого вектора, его мутантного и тестового вектора, а также для значения целевой функции. Кроме того, следует отметить, что такая структура данных позволяет реализовать её размещение в глобальной памяти графического процессора таким образом, чтобы максимизировать объединения запросов к глобальной памяти, что важно для достижения существенного повышения производительности [14;

15]. Схема распределения памяти представлена на рис. 2.

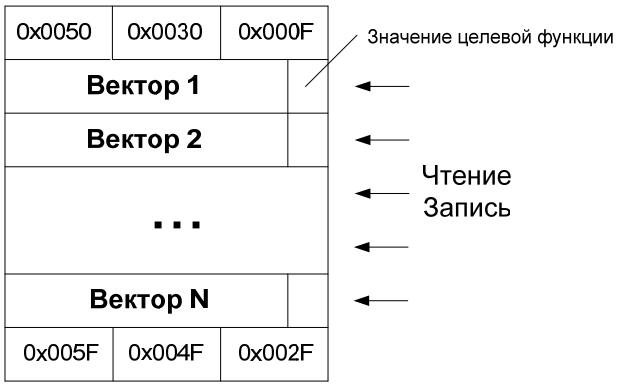


Рис. 2. Распределение памяти для кластера векторов в памяти графического процессора

Согласно такой структуре распределения данных вектора метода дифференциальной эволюции располагаются в памяти не последовательно целиком, а последовательно по каждой ячейки вектора, т. е. сначала располагаются все ячейки для сохранения значения целевой функции, затем все ячейки для хранения первого оптимизируемого параметра и т. д. При использовании интегральных или вещественных типов данных гарантируется соблюдение выравнивания данных, обращение к последовательно упорядоченным ячейкам глобальной памяти в пределах одного варпа и, как следствие, объединение запросов.

Из-за неполной линейности метода, в частности при формировании тестового вектора в зависимости от установленных параметров метода, а также на этапе выбора вектора для нового шага алгоритма, в зависимости от значения целевой функции могут возникать расхождения варпов. Это негативно влияет на производительность, так как требует сериализации вычислений, т. е. последовательного выполнения всех веток ветвления, требуемых разными нитями в варпе. Для преодоления этой проблемы следует заменять прямые операции ветвления (if…else) посредством логических вычислений. Итоговая схема предлагаемой реализации отображена на рис. 3.

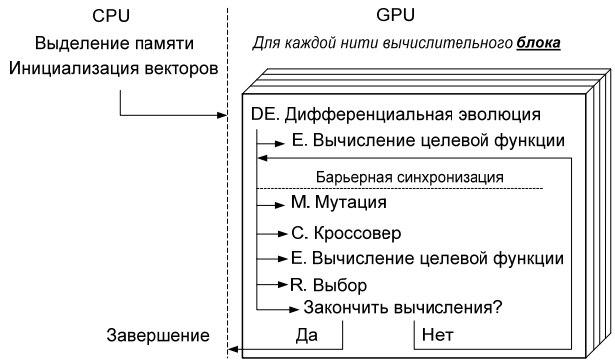


Рис. 3. Предлагаемая реализация

Заключение. В работе представлена улучшенная схема реализации метода дифференциальной оптимизации на графическом процессоре, позволяющая минимизировать издержки вызовов вычислительных ядер, использовать быструю встроенную барьерную синхронизацию и удобную для распределения нагрузки между несколькими CUDA-потоками. Всё это в комплексе делает подобную схему построения вычислительного процесса удобной для реализации программ, целью которых является выполнение большого количества операций глобального поиска.

References

1. Storn R., Price K. *Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces.* Journal of Global Optimization. 1997, 11(4), p. 341–359.

2. Veronese L.P., Krohling R.A. *Differential evolution algorithm on the GPU with C-CUDA*. In Proceedings of Evolutionary Computation (CEC). 2010.

3. Gonzalez D., Barriga N. G. *Fully parallel differential evolution.* In Competition of GPUs for Genetic and Evolutionary Computation at the 2011 Genetic and Evolutionary Computation Conference. GECCO'2011.

4. Kromer P., Platos J., Snasel V., Abraham A. *A comparison of many-threaded differential evolution and genetic algorithms on CUDA*. Nature and Biologically Inspired Computing, 2011, p. 509–514.

5. Ramirez-Chavez L. E., Coello Coello C. A., Rodriguez-Tello E. A GPU-Based Implementation of Differential Evolution for Solving the Gene Regulatory Network Model Inference Problem. In Proceedings of: Proceedings of the Fourth International Workshop on Parallel Architectures and Bioinspired Algorithms, WPABA, 2011.

6. Davendra D., Gaura J., Bialic-Davendra M., Senkerik R. *GPU based enhanced differential evolution algorithm: a computational analysis.* In Proceedings of 26th European Conference on Modelling and Simulation, 2012, ISBN: 978-0-9564944-4-3.

7. Kromer P., Platos J., Snasel V., Abraham A. *Many-Threaded Differential Evolution on the GPU.* Massively Parallel Evolutionary Computation on GPGPUs, Natural Computing Series, Springer, 2013, p. 121–147.

8. Qin A. K., Raimondo F., Forbes F., Ong Y. S. *An improved CUDA-based implementation of differential evolution on GPU.* In Proceedings of the 14th annual conference on Genetic and evolutionary computation. GECCO '12, p. 991–998.

9. Price K., Storn R., Lampinen J. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer, 2005, ISBN: 3540209506.

10. Storn R. *On the usage of differential evolution for function optimization.* NAFIPS, 1996, p. 519–523.

11. Sanders J., Kandrot E. *CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming.* Addison-Wesley. 2010, ISBN 978-0-13-138768-3.

12. Kirk D. B., Hwu W. *Programming Massively Parallel Processors. A Hands-on Approach.* Elsevier, 2010, ISBN: 978-0-12-381472-2.

13. Hwu W. *GPU Computing Gems Emerald Edition.* Elsevier, 2011, ISBN: 978-0123849885.

14. Wilt N. *CUDA Handbook: A Comprehensive Guide to GPU Programming.* Addison-Wesley. 2013, ISBN: 978-0-321-80946-9.

15. Hwu W. *GPU Computing Gems Jade Edition.* Elsevier, 2011, ISBN: 978-0123859631.

© Фарков М. А., Легалов А. И., 2014

УДК 004.93'1

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 162–167

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ РУКИ ЧЕЛОВЕКА НА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕРФЕЙСОВ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

М. М. Чудновский

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660028, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: chudnovskymax@gmail.com

Предложен алгоритм для распознавания жестов руки человека на видеопоследовательности в режиме реального времени, основанный на принципах цветовой кластеризации объектов, нахождения межэлементной разницы для видеопоследовательностей и контурного анализа. Решены задачи локализации, выделения ключевых признаков и распознавания жестов. Предложенный метод не требует длительного обучения классификаторов по массивам изображений жестов. Домен распознаваемых объектов задается параметрически на этапе первоначальной настройки алгоритма. Разработано специализированное программное обеспечение для экспериментального анализа ключевых показателей эффективности предложенного алгоритма. Показаны результаты оценки производительности метода и устойчивости распознавания. На основе полученных экспериментальных данных показана применимость алгоритма для распознавания жестов руки человека в режиме реального времени и возможность реализации на различных платформах вычислительной техники, что позволяет его использовать, прежде всего, в ракетно-космической отрасли для построения эффективных систем управления на основе жестовых интерфейсов.

Ключевые слова: жестовый интерфейс, распознавание жестов, цветовая кластеризация объектов, межэлементная разница видеопоследовательности, контурный анализ, инвариантные моменты.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 162–167

A REAL-TIME ALGORITHM FOR HUMAN'S HAND GESTURE RECOGNITION ON VIDEO-SEQUENCE FOR HUMAN-COMPUTER INTERACTION INTEFACES

M. M. Chudnovsky

Siberian Federal University
79, Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation
E-mail: Chudnovskymax@gmail.com

The author presents the new real-time algorithm for hand gestures recognizing on a video sequence, based on the color clustering principles, interframe differences for video sequences and contour analysis principal. The first chapter of this paper contains the research of related work, which is based on Viola-Jones algorithm, the search for the skin color, wavelet transformation, localization of the centroid of the image, etc. The second chapter describes the new gesture recognition approach, and third includes experiment results. A proposed gesture recognition algorithm resolves two tasks: gesture localization and gesture recognition. The gesture localization task is resolved by compilation results of the image segmentation by human skin color clustering principle and motion search on the video sequences. The feature extraction task is resolved by invariant gesture contour moments analysis. A presented approach does not use any tutorial images. Gesture domain is not close and can be set up during initialization process. Key performance indicators (KPI) of the proposed approach are number of processed video sequence items per time unit and gesture recognition stability mark. The analysis of the performance of the proposed algorithm shows that the performance is at a high level. An average frame rate, which can function designed system is about 50 fps, which even exceeds the ability of the human visual perception. Recognition stability depends on environment condition changes, but the number of recognition errors can be reduced to a minimum by video device calibrating. The quality of recognition is 96%, which is a good indicator for such purpose algorithms. The KPI analysis, based on experimental data, is shown the applicability of the proposed approach in real-time gesture recognition systems, based on different hardware platforms. This fact allows to use the algorithm primarily in the aerospace industry to build effective management systems based on gestural interfaces.

Keywords: gestural interface, gesture recognition, objects color clustering, interframe difference for video sequences, contour analysis, invariant moments.

Введение. Одним из новейших методов человеко-машинного взаимодействия является использование систем распознавания определенных движений частей человеческого тела – жестов. Для «захвата» жестов человека могут использоваться различные устройства, например, ультразвуковые локаторы, кинематические датчики, системы структурированной подсветки и т. д., но наиболее распространенным устройством для получения данных о жестах пользователя является видеокамера. Исходя из этого, в работе рассматривается алгоритм распознавания жестов на видеопоследовательностях, так как подобный формат информации о жестах пользователя наиболее распространен ввиду распространенности устройств – видеокамер.

Задача распознавания жеста на видеопоследовательности заключает в себе несколько основных подзадач: локализацию жеста на элементе видеопоследовательности (поиск целевого объекта), выделение ключевых признаков локализованного жеста и сравнение этих признаков с эталонными значениями из базы данных. В зависимости от области применения жестового интерфейса указанные подзадачи могут решаться по-разному для обеспечения требований производительности и точности распознавания жестов.

Анализ существующих алгоритмов распознавания жестов. Как уже отмечалось, возможны различные подходы к решению подзадач распознавания жестов. Для локализации жестов на элементах видеопоследовательности часто используется метод Виолы–Джонса, например в работах [1, с. 103–105; 2]. Этот подход основан на принципах интегрального представления изображений, построения классификаторов на основе адаптивного усиления и каскадного комбинирования классификаторов. Данный метод требует наличия обучающей выборки изображений, обладает низкой скоростью обучения классификаторов, однако отличается высокой скоростью работы, что позволяет его использовать в системах реального времени. Важно отметить, что применимость метода Виолы–Джонса ограничивается конечным множеством возможных жестов для распознавания (в соответствии с обучающей выборкой). Алгоритм хорошо работает при небольшом угле отклонения, однако при отклонении угла более 30 градусов качество результатов резко падает. В качестве альтернативы может использоваться метод сегментации изображения на основе цветового кластера кожи [3, с. 2], который обладает низкой вычислительной стоимостью, однако не обеспечивает достаточной робастности жестов при наличии схожих по цвету объектов на исходной видеопоследовательности. Качество работы данного метода также сильно зависит от условий окружающей среды [4, с. 434].

Выделение ключевых признаков может осуществляться с помощью вельвет-преобразования, как показано в работах [1, с. 105–106; 2]. Этот подход показал совою эффективность во многих задачах обработки изображений. Важно отметить, что подобный подход также требует четко определенного домена возможных к распознаванию жестов и предварительного обучения. В работе [3, с. 2–3] используется принцип нахождения центроида локализованного объекта и расчета расстояния до максимально удаленных от цента точек. Данный подход инвариантен к положению жеста, однако сильно ограничен набором робастных жестов.

Алгоритм распознавания жестов. Классический сценарий использования жестовых интерфейсов предполагает захват и анализ движения человеческого тела на статичном фоне, без иных движущихся объектов. Исходя из данного предположения, а также в условиях работы в реальном времени для локализации жестов в данной работе предлагается комбинированный метод на основе сегментации исходного изображения с учетом цветового распределения кожи человека и нахождения межэлеметной разницы для видеопоследовательности – простейшего детектора движения. Предложенные методы обладают низкой вычислительной стоимостью, что позволяет построить высокопроизводительную систему. Приемлемое качество распознавания достигается за счет комбинации данных методов, при этом не требуется предварительное обучение, а домен возможных объектов для локализации не является замкнутым – можно задавать произвольные жесты, а также изменять их впоследствии.

Выделение ключевых признаков основано на принципах контурного анализа, что позволяет выделить характеристики, инвариантные масштабу и положению локализованного жеста. Подобный подход не требует предварительного обучения классификаторов, а значит, возможно динамически задавать классы при настройке алгоритма пользователем.

Сегментация изображения с учетом цветового кластера кожи человека. Принцип сегментации изображений на основе цветового кластера пикселей, образующих кожу человека, базируется на положении, что у людей различных рас составляющие цветового тона кожи меняются незначительно. Изменение состояния человека (эмоционального, физического) также слабо влияет на цвет его кожи [5, с. 2–3]. Результаты детектирования целевых объектов на основе цвета кожи не зависят от расположения и ракурса [6, с. 653–654]. Данные выводы позволяют говорить о том, что определение кожи по цвету (и сегментация изображений, основанная на этом принципе) является перспективным методом для применения в различных системах технического зрения.

Так как цвет кожи человека при контролируемом освещении занимает ограниченное подмножество цветового пространства [7, с. 593], эффективным и производительным решением является пороговый классификатор. Составленная в этом случае система неравенств для цветовых компонент классифицирует

элементы изображения по их соответствию цвету кожи человека. В зависимости от выбранных цветовых моделей неравенства будут различны, как и суммарная ошибка работы алгоритма выделения кожи [4, с. 433]. Данные анализа показывают преимущество ортогональной цветовой модели YCbCr [4, с. 432]. Границы цветового кластера кожи и показатель суммарной ошибки при контролируемом освещении для этой модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели цветового кластера кожи

Цветовая модель	Граничные значения	Показатель общей ошибки детектирования
YCbCr	$25 \le Y < 220$ $100 \le Cb < 130$ $140 \le Cr < 190$	0,074

Количество операций при таком подходе соизмеримо с количеством элементов на изображении, а результат работы алгоритма представляет собой двоичную маску локализации. В качестве фильтров пред- и постобработки используются операции размытия и дилатации.

Нахождение межэлементной разницы для видеопоследовательности. Алгоритм вычисления межкадровой разности двух кадров для случая обработки цветного видео в формате RGB на вход принимает два элемента видеопоследовательности, представляющие собой две последовательности байт в формате одноканального изображения RGB. Оптимальным по производительности методом является приведение исходного полноцветного изображения RGB к изображению в серых тонах. В качестве первичного фильтра выступает операция эрозии исходного изображения. Далее производится вычисление попиксельных межкадровых разностей по следующей схеме:

$$D^*(i,j,n) = \left|D(i,j,0) - D(i,j,n)\right|, \qquad (1)$$

где $D(i,j,n)$ – значения яркости для текущего пикселя n-го кадра видеопоследовательности; $D(i,j,0)$ – значения яркости для текущего пикселя эталонного кадра фона; $D^*(i,j,n)$ – результирующее значение яркости для текущего пикселя n-го кадра видеопоследовательности. Полученное одноканальное изображение в результате межкадровой разницы подвергается пороговому преобразованию с заранее определенным параметром T:

$$M(i,j,n) = \begin{cases} 0, D^*(i,j,n) > T, \\ 255, D^*(i,j,n) < T, \end{cases} \qquad (2)$$

где $M(i,j,n)$ – значение элемента изображения после преобразования; T – пороговый уровень преобразования. Таким образом, на выходе алгоритма формируется двоичная маска. Детектор движения использует данные, предварительно сформированные системами обучения. В работе поиск движения базируется на данных о фоне сцены, на которой определяется перемещение целевых объектов – жестов руки человека. При получении нового кадра видеопоследовательности происходит подсчет абсолютной разницы между текущим кадром и данными об усредненном фоне. На основании этого получается разностная карта двух кадров, которая содержит информацию об объектах движения. Разностная карта (изображение в серых тонах) подвергается пороговому преобразованию, в результате чего получается бинарная маска локализации движения.

Сопоставление результатов локализации кожи и движения. Результатом определения кожи по цвету, а также разностного детектора движения являются изображения, содержащие так называемую бинарную маску, при наложении которой на исходный кадр можно получить объект, который детектируется в рамках рассматриваемого подхода. Исходя из того, что оба метода дают результат в одинаковом формате, а также учитывая тот факт, что оба метода используются для детектирования одного и того же целевого объекта, становится возможным объединение выходных изображений по принципу пересечения:

$$M_R = M_s \cap M_M, \qquad (3)$$

где M_s – бинарная маска, полученная в результате поиска кожи человека по цвету; M_m – бинарная маска, полученная в результате детектировании движения руки человека; M_R – результирующая маска. Результаты локализации жеста показаны на рис. 1.

а *б* *в*

Рис. 1. Бинарные маски локализации жеста: *а* – сегментация изображения с учетом цветового кластера кожи; *б* – межэлементная разность для видеопоследовательности (поиск движения); *в* – результирующая маска локализации жеста

Контурный анализ. Контурный анализ позволяет описывать, хранить, сравнивать и производить поиск объектов, представленных в виде своих внешних очертаний – контуров. Предполагается, что контур содержит всю необходимую информацию о форме объекта. Внутренние точки объекта во внимание не принимаются. Это ограничивает область применимости алгоритмов контурного анализа, но рассмотрение контуров позволяет перейти от двумерного пространства изображения к пространству контуров и тем самым снизить вычислительную и алгоритмическую сложность. Эффективным методом анализа и сравнения ограничивающих областей (контуров) является анализ их моментов.

Момент – это суммарная характеристика контура, полученная интегрированием (или суммированием) всех пикселей контура. Для функции $f(x,y)$, которая представляет собой изображение в серых тонах, моменты определяются следующим образом:

$$m_{p,q} = \iint x^p y^q f(x,y)dxdy, \qquad (4)$$

где p и q – порядок возведения в степень соответствующего параметра.

Использование моментов позволяет производить анализ и сравнение контуров. Однако характеристики контура, найденные по формуле (4), не пригодны для алгоритма распознавания, так как простые моменты являются зависимыми от площади локализованного жеста и ориентации его контура в системе координат. Для решения этих проблем необходимо рассчитать нормализованные центральные моменты:

$$v_{p,q} = \frac{\iint (x-x_c)^p (y-y_c)^q f(x,y)dxdy}{m_{00}^{\frac{p+q}{2}+1}}, \qquad (5)$$

где x_c, y_c – координаты центра тяжести изображения.

Нормализованные центральные моменты используются для получения характеристик контуров не зависящих от сдвигов и вращения, т. е. инвариантов, которые рассчитываются следующим образом [8, с. 183–184]:

$$\begin{gathered}
I_1 = v_{20} + v_{02}, \\
I_2 = (v_{20} - v_{02})^2 + 4v_{11}^2, \\
I_3 = (v_{30} - 3v_{12})^2 + (3v_{21} - v_{03})^2, \\
I_4 = (v_{30} + v_{12})^2 + (v_{21} + v_{03})^2, \\
I_5 = (v_{30} - 3v_{12})(v_{30} + v_{12})((v_{30} + v_{12})^2 - \\
-3(v_{21} + v_{03})^2) + (3v_{21} - v_{03})(v_{21} + v_{03}) \times \\
\times (3(v_{30} + v_{12})^2 - (v_{21} + v_{03})^2), \\
I_6 = (v_{20} - v_{02})((v_{30} + v_{12})^2 - (v_{21} + v_{03})^2) + \\
+ 4v_{11}(v_{30} + v_{12})(v_{21} + v_{03}), \\
I_7 = (3v_{21} - v_{03})(v_{21} + v_{03})(3(v_{30} + v_{12})^2 - \\
-(v_{21} + v_{03})^2) - (v_{30} - 3v_{12})(v_{21} + v_{02}) \times \\
\times (3(v_{30} + v_{12})^2 - (v_{21} + v_{03})^2).
\end{gathered} \qquad (6)$$

Для каждого элемента видеопоследовательности выбирается контур локализованного жеста, после чего вычисляются его главные компоненты – инварианты I_1–I_7. Процесс распознавания заключается в сравнении главных компонент неизвестного контура с компонентами всех возможных жестов для распознавания, которые могут параметрически задаваться на этапе первичной настройки алгоритма (рис. 2).

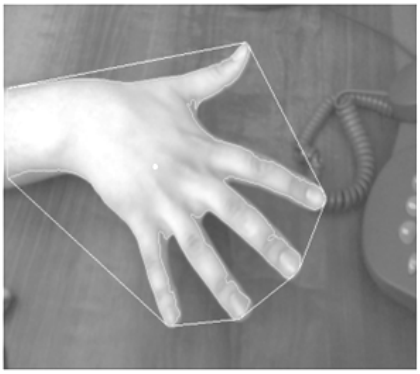


Рис. 2. Результат расчета контура локализованного жеста

Процесс распознавания жестов на видеопоследовательности. Работа алгоритма распознавания строится на двух основных этапах:

1) предварительная настройка;

2) распознавание жеста на элементе видеопоследовательности.

В свою очередь, этап распознавания состоит из локализации жеста на элементе видеопоследовательности, выделения главных компонент жеста и сравнения с заранее заданными (на этапе настройки) компонентами эталонных жестов. Алгоритмы этапов 1 и 2 представлены на рис. 3.

Экспериментальный анализ. Ключевыми показателями эффективности разработанного алгоритма являются производительность и устойчивость распознавания жестовой информации. Производительность системы оценивается таким параметром, как количество обработанных кадров в секунду, а устойчивость распознавания – показателем суммарной ошибки распознавания. При анализе качества распознавания, в связи с тем, что невозможно определить ошибку распознавания того или иного жеста (алгоритм работает на незамкнутом наборе жестов), для оценки качества работы системы используется показатель устойчивости распознавания изображения.

Для проведения экспериментов была разработана программа на платформе Microsoft.Net, реализующая предложенный алгоритм. При проведении экспериментов использовались внутренние индикаторы работоспособности разработанного ПО, а также использование сторонних программ для осуществления тестирования и мониторинга загрузки вычислительных мощностей аппаратной платформы. Эксперименты проводились на оборудовании компании HP усредненной конфигурации.

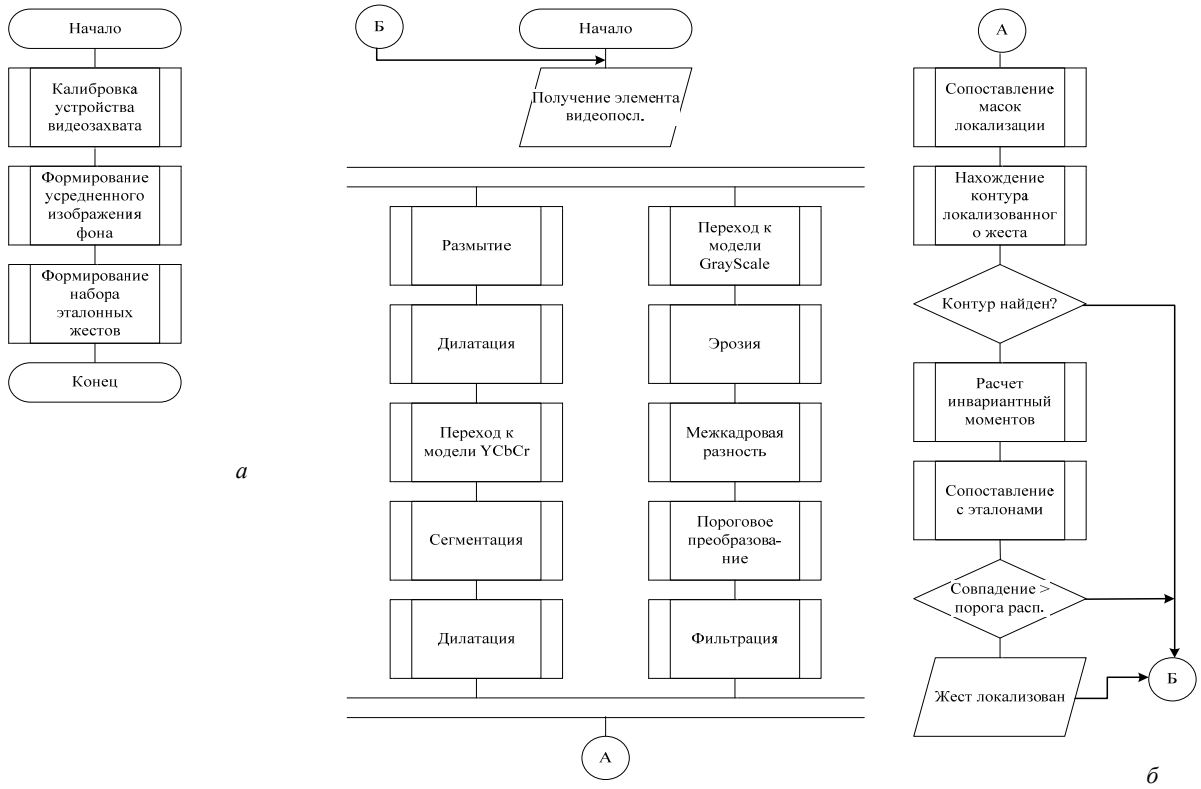


Рис. 3. Алгоритмы этапов процесса распознавания жеста: *а* – предварительная настройка; *б* – обработка элементов видеопоследовательности, процесс распознавания

Средняя производительность системы рассчитывается исходя из времени, которое требуется для обработки одной сцены. Количество кадров в секунду вычисляется как

$$FPS_{avg} = \frac{1}{T_{avg}}, \qquad (7)$$

где FPS_{avg} – максимально возможное количество кадров секунду; T_{avg} – время обработки одного кадра. На рис. 4 представлен график распределения времени обработки одного элемента видеопоследовательности.

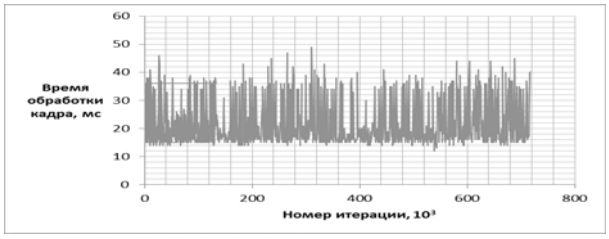


Рис. 4. Распределение времени обработки кадра

Анализ устойчивости распознавания основывается на покадровой оценке детектируемых контуров на сцене (анализ одного элемента видеопоследовательности представляет собой самостоятельный эксперимент), общая ошибка распознавания

$$Er = \frac{\left(Er_I \left|N - C\right| + Er_{II} \left|C\right|\right)}{\left|N\right|}, \qquad (8)$$

где Er_{I} – ошибка 1-го рода; Er_{II} ошибка 2-го рода; N – общее количество кадров; C – количество кадров, на которых изображен контрольный жест. Результаты исследования устойчивости распознавания представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки устойчивости распознавания

Вид ошибки устойчивости распознавания	Значение ошибки
Ошибка первого рода	0,0070 (0,7 %)
Ошибка второго рода	0,0740 (7,4 %)
Суммарная ошибка	0,0405 (4,05 %)

Анализ показателей эффективности предложенного алгоритма показывает, что производительность находится на высоком уровне. Средняя частота кадров, на которой может функционировать разработанная система, составляет около 50 fps, что даже превышает способности восприятия органов человеческого зрения.

Устойчивость распознавания зависит от изменений условий внешней среды, однако количество ошибок, возникающих при этом, снижается к минимуму посредством калибровки устройства видеозахвата.

Качество распознавания достигает 96 %, что является хорошим показателем для алгоритмов подобного назначения.

Новый алгоритм распознавания жестов руки человека, описанный в рамках работы, основывается на цветовой кластеризации кожи, поиске движения на видеопоследовательности и принципах контурного анализа. Предложенный алгоритм решает задачи локализации целевого объекта (кисти руки человека) на сцене, а также позволяет произвести анализ контекста его движения и формы – распознать жест. Анализ показателей эффективности алгоритма позволяет сделать вывод о возможном применении метода как в настольном, так в мобильном сегментах средств вычислительной техники. Широкий спектр применимости позволяет использовать алгоритм в различных направлениях науки и техники для построения эффективных интерфейсов человеко-машинного взаимодействия, прежде всего в ракетно-космической отрасли.

Библиографические ссылки

1. Фан Н. Х., Буй Т. Т., Спицын В. Г. Распознавание жестов на видеопоследовательности в режиме реального времени на основе применения метода Виолы–Джонса, алгоритма Camshift, вейвлет-преобразования и метода главных компонент // Управление, вычислительная техника и информатика : Вестн. Том. гос. ун-та.. 2013. № 2(23). С. 102–111.

2. Мурлин А. Г. [и др.]. Алгоритм и методы обнаружения и распознавания жестов руки на видео в режиме реального времени // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. 2014. № 97 (03). URL: http://ej.kubagro.ru/2014/03/pdf/20.pdf (дата обращения 01.06.2014).

3. Malima A., Ozgur E., Cetin M. A Fast Algorithm for Vision-Based Hand Gesture Recognition for Robot Control // Proc. of the IEEE 14th. Antalya, 2006. P. 1–4.

4. Чудновский М. М., Русанова О. А. Исследование робастности принципа цветовой кластеризации объектов для построения систем человеко-машинного взаимодействия // Системный анализ и информационные технологии : V Междунар. конф. САИТ – 2013 (19–25 сент. 2013, г. Красноярск). В 2 т. Т. 2. Красноярск : ИВМ СО РАН, 2013. С. 431–435.

5. Shi L. Skin Colour Imaging That Is Insensitive to Lighting // Proc. of AIC Conf. on Colour Effects & Affects (June 15–18, Stockholm). 2008. no. 102.

6. Martinkauppi B. Detection of Skin Color under Changing Illumination: A Comparative Study // Proc. of the 12th Intern. Conf. on Image Analysis and Processing. (September 17–19, Mantova). 2003. P. 652–657.

7. Fleck M. Finding Naked People // Proc. of Fourth European Conference on Computer Vision (ECCV'96). (April 14–18, Cambridge). 1996. Vol. II. P. 592–602.

8. Hu M. K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants // IRE Trans. Info. Theory. 1962. Vol. IT-8. P. 179–187.

References

1. Fan N. Kh., Bui T. T., Spitsyn V. G. [Real-time Gesture recognition on video sequence based on Viola-Jones method, algorithm Camshift, the wavelet transform and principal component analysis]. *Vestnik TGU.* 2013, no. 2 (23), p. 102–111. (In Russ.)

2. Murlin A. G., Piotrovskiy D. L., Rudenko E. A., Yanaeva M. V. [Real-time algorithm and methods for hand gesture recognition on video]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2014, no. 97 (03). (In Russ.) Available at http://ej.kubagro.ru/2014/03/pdf/20.pdf (accessed 01.06.2014).

3. Malima, A., Ozgur, E., Cetin, M. A Fast Algorithm for Vision-Based Hand Gesture Recognition for Robot Control. *Proc. of the IEEE 14th*. Antalya, 2006, pp. 1–4.

4. Chudnovskiy M. M., Rusanova O. A. [The object's color clustering principle research for human-computer interaction systems implementation] *Proc. 5th International conference "System analysis and information technologies"*. Krasnoyarsk, 2013, p. 431–435. (In Russ.)

5. Shi L. Skin Colour Imaging That Is Insensitive to Lighting. *Proc. of AIC Conference on Colour Effects & Affects,* June 15–18. Stockholm, 2008, p. 102.

6. Martinkauppi, B. Detection of Skin Color under Changing Illumination: A Comparative Study. *Proc. of the 12th International Conference on Image Analysis and Processing, September 17-19.* Mantova, 2003, p. 652–657.

7. Fleck M. Finding Naked People. *Proc. of Fourth European Conference on Computer Vision (ECCV'96),* Vol. II, April 14–18. Cambridge, 1996, p. 592–602.

8. Hu M. K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. *IRE Trans. Info. Theory.* 1962, vol. IT-8, p. 179–187.

© Чудновский М. М., 2014

УДК 524.38

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 168–171

ДВЕ НОВЫЕ ЗАТМЕННО-ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ В СОЗВЕЗДИИ ЦЕФЕЯ

А. С. Шендель, С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин

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

Кратко описан метод поиска переменных звезд, который основан на анализе распределения среднеквадратичного отклонения блеска звезды от звездной величины. Указаны характеристики оборудования, на котором был получен наблюдательный материал для поиска. Результатом поиска являются описанные в статье две новые затменно-переменные звезды, выявленные по наблюдательному материалу обсерватории СибГАУ. Звезда 2MASS 22065429+6059580 и USNO-A2 1425-12666148 имеют типы переменности EW и EA соответственно. Для них определены основные параметры переменности: максимум и минимум блеска, моменты главных экстремумов, периоды изменения блеска, построены кривые блеска, приведенные к одному периоду, приведены карты окрестностей выявленных переменных звезд, дан краткий анализ.

Ключевые слова: затменно-переменная звезда, метод Лафлер–Кинмана.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 168–171

TWO NEW ECLIPSING SYSTEMS IN CEPHEUS CONSTELLATION

A. S. Shendel, S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin

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

In this work we describe the method of variable stars search, which is based on the analysis of distribution of a standard deviation of magnitude of stars from magnitude (software VaST and C-Munipack). We present the equipment on which the observation for search was received as well. Our observations have been performed in Krasnoyarsk with a Hamilton telescope (D = 400 mm, F = 915 mm) equipped with an FLI ML9000 CCD chip (3056x3056 pixels, pixel size 12 μm). The size of the fields taken is 2.3 × 2.3. All our CCD-observations were obtained without a filter. All images were obtained with 30-second exposure times. MaxImDL software was used for photometry and for basic reductions for dark current, flat fields and bias. The magnitudes were referred to red magnitudes of comparison stars from the USNO-A2.0 catalog (Monet et al. 1998). In this article we present two new eclipsing binary stars. They were discovered, using own CCD-observation and software C-Munipack. Periods were derived using the WinEfk software provided by V. P. Goranskij. The coordinates in the Table are from the USNO-A2.0 catalog. Stars 2MASS 22065429+6059580 and USNO-A2 1425-12666148 have types of variability of EW and EA respectively. The photometry of star 2MASS 22065429+6059580 had been with star 2MASS 22065444+6100029 together because their location nearby. General properties of variability for new variable stars: maximum and minimum of magnitude, epochs of the main minima, periods of change of light, we constructed the curves of light to one period, we present chart of sky near new variable stars are presentd. We give a short analysis of the results as well.

Keywords: eclipsing binary variable stars, Lafler-Kinman's method.

Введение. Исследование переменных звезд как область исследований в астрономии является сравнительно молодой. К концу XIX века стало ясно, что явление звездной переменности распространено довольно широко, и речь может идти не о десятках звезд, меняющих свой блеск, а о многих тысячах переменных звезд, поэтому научные основы этой области знаний были заложены только в XIX веке.

Появление и повсеместное внедрение в практику методов ПЗС-фотометрии, бурное развитие вычислительной техники, внедрение новых методик и методов – все это позволяет расширить возможности поиска переменных звезд и увеличить точность измерений. Благодаря этому даже на сравнительно небольших телескопах, оснащенных ПЗС-приемниками, появляется возможность открывать и исследовать сотни и тысячи новых переменных звезд.

Таблица 1

Звезды сравнения

№	Переменная звезда	Звезда сравнения	
		Номер	m_R
1	1500-08794238	1500-08776454 ($22^h\ 00^m\ 02^s,23$ +61º00′42″,6) 1500-08800246 ($22^h\ 07^m\ 12^s,35$ +60º58′32″,2)	$13^m,295$ (R) $14^m,945$ (R)
2	1425-12666148	1425-12685602 ($22^h\ 01^m\ 58^s,27$ +59º34′08″,0) 1425-12657985 ($22^h\ 00^m\ 51^s,31$ +59º30′13″,7)	$15^m,460$ (R) $14^m,223$ (R)

Поиск переменных звезд может быть осуществлен различными методами: визуальным методом, фотографическим методом (блинкование, гарвардский метод) и методом, который использует фотометрические ряды звезд за определенный промежуток времени.

На сегодняшний день наиболее эффективным считается метод поиска переменных звезд с использованием фотометрических рядов. Он основан на анализе распределения среднеквадратичного отклонения блеска звезды $\sigma(m_i)$ от блеска звезды m_i.

Суть метода заключается в следующем. По полученным фотометрическим рядам $\{t_i, m_i\}$ строится распределение среднеквадратичного отклонения блеска звезды (ось ординат) от ее условного блеска (ось абсцисс). Звезды, лежащие выше основного распределения, являются потенциальными кандидатами в переменные звезды, которые в дальнейшем индивидуально исследуются на переменность. Данный метод реализован в двух известных программах по поиску переменных звезд: для операционной системы Windows это C-MUNIPACK [1] и для Unix-подобных операционных систем – VaST, описанная К. Соколовским и А. Лебедевым на конференции молодых ученых в Киеве [2]. Данная программа успешно себя зарекомендовала при работе как с астроснимками, так и с отсканированными изображениями стеклянных фототек [3].

Далее выявленные переменные звезды проверяются на известность в Общем каталоге переменных звезд [4] и по базам данных международного регистра переменных звезд The International Variable Star Index (VSX) [5].

Для получения наблюдательного материала использовалось оборудование обсерватории СибГАУ – телескоп системы Гамильтона с апертурой 400 мм и фокусным расстоянием 915 мм, оснащенный ПЗС-камерой FLI ML9000. Масштаб изображений на полученных снимках составляет 2,7 угловой секунды на пиксель, размер кадра 3056×3056 пикселей. Все изображения исследуемого участка размером 2,3°×2,3° получены в интегральном свете (без фильтра) с экспозициями 30 с.

Поиск переменных звезд проводился на участке 2,3°×2,3° в созвездии Цефея. Материал для поиска был получен в два этапа: сентябрь-октябрь 2012 г. и август-ноябрь 2013 г. По данному материалу ранее сотрудниками обсерватории был проведен поиск переменных звезд с использованием программы VaST. Позднее было принято решение провести поиск переменных звезд с использованием программного обеспечения C-Munipack. Для звезд данного участка получено распределение среднеквадратичного отклонения от звездной величины (рис. 1).

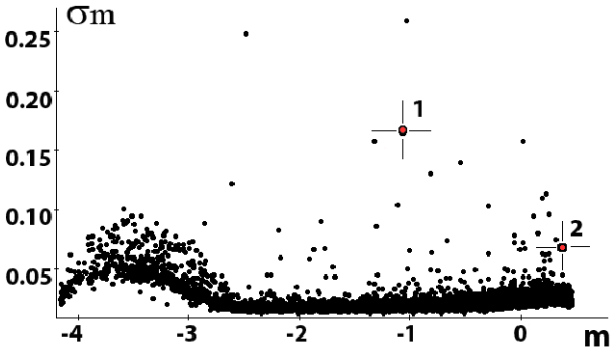


Рис. 1. Распределение среднеквадратичного отклонения блеска звезды от звездной величины исследуемого участка неба в созвездии Цефея

По данному распределению были выявлены две новые переменные звезды (на рис. 1 помечены номерами 1 и 2), ранее не выявленные сотрудниками обсерватории СибГАУ. Также выявленные переменные звезды на момент открытия не были зафиксированы в ОКПЗ и в базе данных VSX. Их номера по каталогам 2MASS 22065429+6059580 и USNO-A2 1425-12666148. Для исследования периодов найденных переменных звезд использовался метод Лафлер–Кинмана, реализованный в программе WinEfK [5; 6].

Фотометрия выполнялась в программе MaxIm DL. В табл. 1 приведены звезды сравнения с указанием их номеров по каталогу USNO-A2.0, их координаты и звездные величины m_R. Звезды сравнения выбирались с учетом близкого расположения к исследуемой переменной звезде так, чтобы блеск одной звезды был больше, а второй – меньше относительно исследуемой звезды.

Переменная звезда 2MASS 22065429+6059580. На карте окрестности звезды (рис. 2) видно, что звезды 2MASS 22065429+6059580 и 2MASS 22065444+6100029 находятся на довольно близком расстоянии ~1,25 секунды дуги. Данное расстояние не превышает масштаба изображения «связки» телескоп–матрица, которое составляет 2,75 угловой секунды на пиксель, поэтому фотометрия этих двух звезд проводилась вместе. Достаточно большая амплитуда изменения блеска $0^m,54$ позволяет утверждать, что вероятнее всего переменность в фотометрический ряд вносится более яркой звездой. Это 2MASS

22065429+6059580. Она является затменно-переменной типа W Большой Медведицы (W UMa, тип переменности имеет обозначение EW). Изменение блеска звезд этого типа вызвано затмениями звезд друг другом в двойных звездных системах, которые состоят из почти соприкасающихся эллипсоидальных компонентов. Как правило, период обращения составляет менее 1 суток. Такие системы обладают кривыми блеска, не позволяющими фиксировать моменты начала и конца затмений, глубины главного и вторичного минимумов почти одинаковы или различаются очень незначительно [7]. На полученной кривой блеска (рис. 3) минимумы различны по глубине, поэтому определить, какой из минимумов главный, не составляло труда. В табл. 2 приведены основные характеристики переменности и формула (эфемерида) расчета момента главного минимума *C* для эпохи *E* в юлианских сутках.

Таблица 2

Основные характеристики звезды 2MASS 22065429+6059580

Номер по каталогу	2MASS 22065429+6059580
Координаты, α_{2000} δ_{2000}	$22^h06^m54^s,294$ $+60°59'58'',08$
Тип переменности	EW
Период, сут	0,356165
Эпоха главного минимума	2456545,187
Максимум блеска	$14^m,16$ (фотометрия 2 звезд вместе)
Минимум блеска	$14^m,70$ (фотометрия 2 звезд вместе)
Эфемерида главного минимума	$C = 2456545{,}187 + 0{,}356165 \times E$

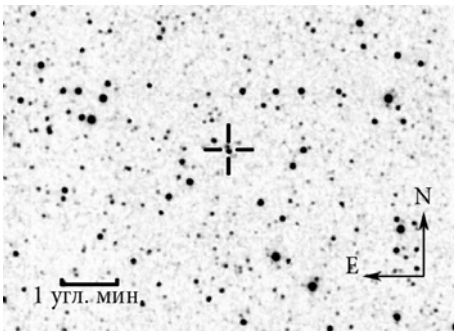


Рис. 2. Карта окрестности звезды 2MASS 22065429+6059580

Переменная звезда USNO-A2 1425-12666148. Основные характеристики переменности приведены в табл. 3, а карта окрестности – на рис. 4. Переменность этой звезды – типа Алголя (прототип переменности β Per, имеет обозначение EA). Это затменно-двойные системы со сферическими или слегка эллипсоидальными компонентами. Кривые блеска таких систем позволяют фиксировать моменты начала и конца затмений. В промежутках между затмениями блеск остается почти постоянным или меняется незначительно, вследствие эффектов отражения, небольшой эллипсоидальности компонентов или физических изменений. Вторичный минимум может не наблюдаться. Периоды заключены в очень широких пределах – от 0,2 до 10000 суток и более. Амплитуды изменения блеска весьма разнообразны и могут достигать нескольких величин [7]. На кривой блеска, приведенной к одному периоду для этой звезды (рис. 5), наблюдается вторичный минимум, который имеет значение $14^m,82$.

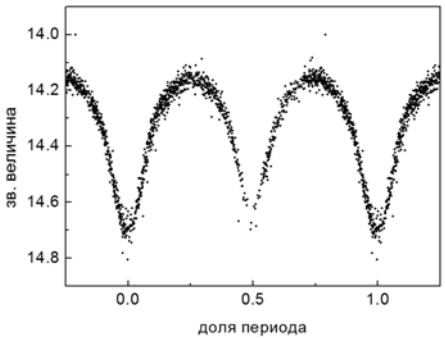


Рис. 3. Кривая блеска звезды 2MASS 22065429+6059580

Таблица 3

Основные характеристики звезды USNO-A2 1425-12666148

Номер по каталогу	USNO-A2 1425-12666148
Координаты, α_{2000} δ_{2000}	$22^h01^m12^s,03$ $+59°32'04'',3$
Тип переменности	EA
Период, сут	1,36327
Эпоха главного минимума	2456183,287
Максимум блеска	$14^m,75$
Минимум блеска	$15^m,09$
Эфемерида главного минимума	$C = 2456183{,}287 + 1{,}336327 \times E$

Следует напомнить, что поиск переменных звезд проводился по ранее исследованным ПЗС-изображениям на предмет новых переменных звезд, но при повторном поиске были найдены еще две переменные звезды: 2MASS 22065429+6059580 и USNO-A2 1425-12666148. Данный факт можно объяснить тем, что при повторном исследовании поиск переменных звезд осуществлялся другим программным обеспечением.

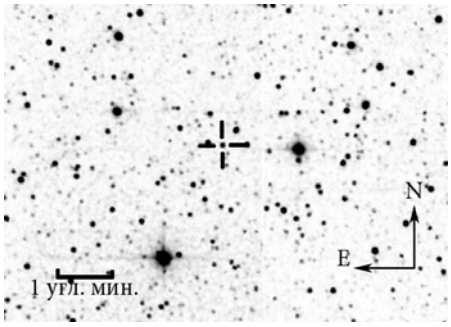


Рис. 4. Карта окрестности звезды USNO-A2 1425-12666148

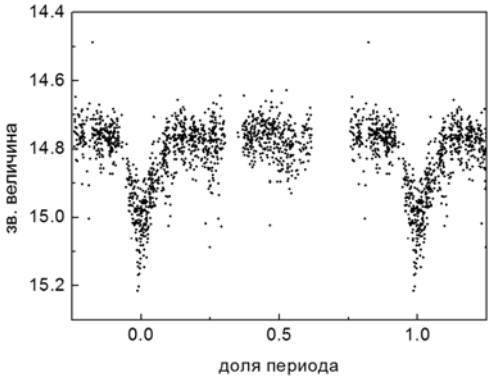


Рис. 5. Кривая блеска звезды USNO-A2 1425-12666148

Заключение. В обсерватории СибГАУ были выявлены 2 новые переменные звезды – 2MASS 22065429+6059580 и USNO-A2 1425-12666148 по наблюдениям с сентября 2012 г. по ноябрь 2013 г. Для новых выявленных переменных звезд построены кривые блеска, приведенные к одному периоду, определены типы переменности, моменты главных экстремумов, диапазон изменения блеска, эпоха главного экстремума и период изменения блеска.

References

1. David Motl. (2011), “C-MUNIPACK: Package of software utilities for reducing astronomy CCD images intended on a observation of variable stars”, available at: http://c-munipack.sourceforge.net/ (accessed 30 Juny 2014).

2. Sokolovsky K., Lebedev A. (2005) “POISK - a SExtractor front-end for search of variable objects in series of ccd images”, *12th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*, Kyiv, Ukraine, April 19–23, 2005, Eds.: Simon, A.; Golovin, A., Kyiv University Press, p. 79.

3. Kolesnikova D. M., Sat L. A., Sokolovsky K. V., Antipin S. V., Samus N. N. (2008), “New Variable Stars on Digitized Moscow Collection Plates. Field 66 Ophiuchi (Northern Half)”, *Acta Astronomica*, Vol. 58, p. 279–292.

4. Samus N. N., Durlevich O. V., Kazarovets E. V., Kireeva N. N., Pastukhova E. N., Zharova A. V., et al. (2012), “General Catalogue of Variable Stars”, available at: http://www.sai.msu.su/gcvs/gcvs/ (accessed 30 Juny 2014).

5. The International Variable Star Index (2014), available at: http://www.aavso.org/vsx/ (accessed 30 Juny 2014).

6. Goransky V.P. (2011), “EFFECT for Windows 2005”, available at: http://vgoray.front.ru/software/ (accessed 30 Juny 2014).

7. Samus N. N., Durlevich O. V. (2009), “GCVS Variability Types and Distribution Statistics of Designated Variable Stars According to their Types of Variability”, available at: http://www.sai.msu.su/groups/cluster/gcvs/gcvs/iii/vartype.txt (accessed 30 Juny 2014).

© Шендель А. С., Веселков С. А., Лапухин Е. Г., 2014

УДК 517.55

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 172–176

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ ПРОДОЛЖЕНИИ КРАТНОГО СТЕПЕННОГО РЯДА С ПОМОЩЬЮ ОДНОМЕРНЫХ МАТРИЧНЫХ МЕТОДОВ СУММИРОВАНИЯ

Е. И. Яковлев

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

В теории аналитических функций К. Вейерштрасса понятие аналитического элемента (степенного ряда в C, сходящегося в некотором круге) и его аналитического продолжения являются основными. Метод переразложения степенного ряда, предложенный Вейерштрассом, принципиально решающий задачу аналитического продолжения, оказался малоэффективным при конкретном применении. В работах Ж. Адамара, Г. Миттаг-Леффлера, Ле Руа, Линделефа были предложены так называемые методы суммирования, дающие хорошие результаты для аналитического продолжения степенного ряда в случае звездных областей комплексной плоскости. В дальнейшем в работах Н. У. Аракеляна было получено описание областей, в которых восстановление аналитического продолжения аналитического элемента возможно с помощью универсальных матричных методов суммирования, т. е. областей комплексной плоскости, в которых найдется по крайней мере одна бесконечная матрица, «суммирующая» все аналитические элементы с заданным центром. Эти области оказались спиральными относительно некоторой точки и были названы Аракеляном областями эффективной суммируемости.

Настоящая работа посвящена аналитическому продолжению кратного степенного ряда в класс областей, обобщающих спиральные. С помощью одномерных матричных методов суммирования степенного ряда строятся многомерные матричные методы суммирования для кратного степенного ряда, позволяющие строить аналитическое продолжение этого ряда в максимальную спиральную область, называемую (m,α)-звездой Миттаг-Леффлера функции f, определяемой этим рядом. При этом апробация построенных многомерных матричных методов суммирования кратного степенного ряда проводится с помощью одномерной геометрической прогрессии.

Ключевые слова: кратный степенной ряд, звезда Миттаг-Леффлера, главная звезда, аналитическое продолжение, суммирование кратного степенного ряда, матричные методы суммирования, спиральные области, области эффективной суммируемости.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 172–176

ABOUT ANALYTICAL RESUMING MULTIPLE POWER SERIES BY USING ONE-DIMENSIONAL MATRIX METHODS OF SUMMATION

E. I. Yakovlev

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

In the theory of analytic functions of K. Weierstrass the concept of the analytical element (power series in C converging in a circle) and its analytic continuation are the main. The method of power series expansion at another, series proposed by Weierstrass, fundamentally solves the problem of analytic continuation, proved ineffective in a particular application. In the works of Hadamard, Mittag-Leffler, Le Roy, Lindelof the so-called summation methods that give good results for the analytic continuation of power series in the case of the star domains of the complex plane have been proposed. In the works of Arakelian a description of the areas, in which the restoration of the analytic continuation of the analytical element with a fixed center is possible by using the universal matrix methods of summation is received. This work is about the analytical continuation of multiple power series in the class of fields of synthesis of spiral. Using one-dimensional matrix methods of summation of power series constructed multidimensional matrix methods of summation for multiple power series, which allows you to construct an analytic continuation of this number in the maximum spiral region called (m,a)-the star of the Mittag-Leffler function f defined by this row. This approbation built

multidimensional matrix methods of summation of multiple power series is carried out using one-dimensional geometric progression. That is the domains of the complex plane, there is at least one infinite matrix "summarizing" all analytic elements with a given center. These domains were spiral relative to some point and were named Arakelian domains efficient summability.

Keywords: Multiple power series, star of Mittag-Leffler, the main star, analytic continuation, summation of multiple power series, matrix methods of summation, spiral domains, domains of efficient summability.

Задача аналитического продолжения степенного ряда является одной из классических и восходит еще к К. Вейерштрассу, соответствующая библиография имеется в [1]. Однако метод аналитического продолжения степенного ряда путем его переразложения достаточно трудоемок и нерационален. В дальнейшем более эффективные методы суммирования степенного ряда (аналитического продолжения с помощью матричных методов) были предложены Миттаг-Леффлером, Линделефом, Ле Руа и другими математиками (см., например, [2–5]). Для n = 1 в случае звездных областей достаточно подробная библиография имеется, например, в [6; 7], для случая спиральных областей – в [8; 9]. Одно из первых продолжений степенного ряда в спиральную область принадлежит, наверное, Линделефу [3]. Спустя более полувека, Аракеляну [8] удалось показать, что аналитическое продолжение однократного степенного ряда с помощью матричных методов суммирования возможно только в спиральные области. В случае многих переменных в работах [10–14] имеются различные методы суммирования кратного степенного ряда для звездных областей. В [15] предложен метод, позволяющий суммировать кратный степенной ряд в случае параболически звездных областей (см. ниже определение 1, при $\alpha = (0, \ldots, 0)$). В настоящей работе предлагаются методы суммирования кратного степенного ряда, позволяющего суммировать этот ряд в классе областей в C^n, естественным образом обобщающих как спиральные, так и звездные.

Обозначим $z = (z_1, \ldots, z_n)$ точки n-мерного комплексного пространства C^n, $k = (k_1, \ldots, k_n)$ – мультииндексы, $\| k \| = k_1 + \ldots + k_n$, $k! = k_1! \ldots k_n!$, $z^k = z_1^{k_1} \cdots z_n^{k_n}$, $R^n_> := \left\{ x \in R^n; x_1 > 0, \ldots, x_n > 0 \right\}$; $Q^n_> := \left\{ x \in Q^n : x_1 > 0, \ldots, x_n > 0 \right\}$.

Пусть

$$f(z_1, \ldots, z_n) = \sum_{\|k\| \geq 0} a_{k_1 \ldots k_n} z_1^{k_1} \ldots z_n^{k_n} \qquad (1)$$

n-кратный степенной ряд, который сходится в некоторой окрестности U начала координат в C^n. Максимальная звездная область G, в которую голоморфно продолжается ряд (1), называется звездой Миттаг-Леффлера (или главной звездой) ряда (1) или функции $f(z)$.

Цель настоящей работы – получение аналитического продолжения ряда (1) в класс областей, обобщающих одновременно звездные и спиральные. Поэтому для дальнейшего изложения нам потребуется следующее.

Определение 1. Пусть $x \in R^n_>$, $\alpha \in R^n$. Множество G в C^n назовем (x,α)-спиральным относительно начала координат, если вместе с каждой точкой $z^0 = (z_1^0, \ldots, z_n^0)$ в множестве G содержится (x,α)-отрезок $L_{z_0}^{(x,\alpha)} := \{ z \in C^n : z_1 = z_1^0 t^{x_1(1+i\alpha_1)}, \ldots, z_n = z_n^0 t^{x_n(1+i\alpha_n)}, t \in [0,1] \} \subset G$.

Если функция $f(z)$ голоморфна в некоторой окрестности начала координат в C^n, то максимальную (x,α)-спиральную область G_f^x, в которую голоморфно можно продолжить функцию f, назовем (x,α)-спиральной звездой Миттаг-Леффлера функции f или просто (x,α)-звездой.

Понятие (x,α)-спиральной звезды Миттаг-Леффлера, естественно, шире понятия звезды Миттаг-Леффлера. Особенно наглядно это видно при n = 1 и $\alpha \neq 0$.

Пример 1. Главная звезда функции $f(z) = (1-z)^{-1}$ совпадает с комплексной плоскостью без луча $[1, \infty)$, а ее α-спиральная звезда Миттаг-Леффлера совпадает с множеством

$$M_\alpha := C \setminus \left\{ z \in C : z = t^{(1+i\alpha)}, t \in [1, \infty) \right\}.$$

В случае $\alpha \neq 0$ эти множества различны.

Если $\alpha = 0$, (x,α)-спиральные множества переходят в x-звездные. В случае одного переменного всякая (x,0)-звезда Миттаг-Леффлера совпадает с обычной звездой Миттаг-Леффлера или главной звездой данного степенного ряда, т. е. в случае одного переменного классы x-звездных и звездных множеств совпадают. В случае многих переменных это не так. В [8] приводится пример функции, у которой (1,2)-звезда не совпадает с главной звездой или (1,1)-звездой.

Понятие матричного метода суммирования для одномерного случая и соответствующий обзор литературы приведен в монографиях [6; 7; 12] и работах [8; 9], а для многомерного – в [10; 11].

Пусть $P = \{\tau\}$ – множество на вещественной оси, имеющее предельную точку τ_0 такую, что $\tau_0 \notin P$, и пусть

$$T_\tau(z) = \sum_{\|k\| \geq 0} c_k(\tau) z^k = \sum_{\|k\| \geq 0} c_{k_1 \ldots k_n}(\tau) z_1^{k_1} \ldots z_n^{k_n} \qquad (2)$$

это степенной ряд, коэффициенты которого зависят от произвольного $\tau \in P$, сходящийся в C^n.

Определение 2. Будем говорить, что матрица $T=\{c_k(\tau)\}=\{c_{k_1\ldots kn}(\tau)\}$ или матричный метод T суммирует ряд (1) в области $\Omega(f\in H(\Omega))$, если:

1. Композиция Адамара рядов (1) и (2)

$$T_\tau f(z)=\sum_{\|k\|\geq 0}c_k(\tau)a_kz^k=$$
$$=\sum_{\|k\|\geq 0}c_{k_1\ldots kn}(\tau)a_{k_1\ldots kn}z_1^{k_1}\ldots z_n^{k_n} \qquad (3)$$

при фиксированном $\tau\in P$ абсолютно сходится в некоторой полной, логарифмически выпуклой области, содержащей Ω.

2. Локально равномерно в Ω (равномерно на любом компакте из Ω) выполняется равенство

$$f(z)=\lim_{\tau\to\tau_0}T_\tau * f(z),\ \forall z\in\Omega. \qquad (4)$$

Замечание. Можно рассматривать класс матричных методов T, которые при $\tau\in P$ не задают целую функцию, но выполняется условие 1. Это существенно расширит класс рассматриваемых методов, но вызовет определенные трудности при проверке условия 1. Если ряд (1) сходится в непустой окрестности 0 и матричный метод T при $\tau\in P$ задает целую функцию, тогда условие 1 не требует проверки, оно выполняется автоматически. Что и предполагается в настоящей работе.

В одномерном случае известны следующие матричные методы:

1. Спиральный вариант метода Миттаг-Леффлера

$$M(\tau):=\left\{m_k(\tau)=\frac{1}{\Gamma(k(\tau(1+i\alpha)+1))};\tau\in P:=(0,1],\tau_0=0\right\}.$$

2. Метод Ле Руа

$$L(\tau):=\left\{L_k(\tau)=\frac{\Gamma(k\tau+1)}{\Gamma(k+1)};\tau\in P:=[0,1),\tau_0=1\right\}.$$

3. Метод Линделефа

$$\Lambda(\tau):=\left\{\Lambda_k(\tau)=k^{-k\tau};k>0,\tau\in P:=[0,1),\tau_0=0\right\}.$$

Более подробно о вышеприведенных методах суммирования можно узнать в [1, с. 247].

Для одномерного случая теорема Окада [6] позволяет апробировать каждый из матричных методов лишь на геометрической прогрессии. Если матричный метод суммирует геометрическую прогрессию в ее α-спиральной звезде Миттаг-Леффлера, то этот метод суммирует любую функцию в ее α-спиральной звезде Миттаг-Леффлера. Таким образом методы Ле Руа и Линделефа суммируют произвольную функцию в ее главной звезде, а спиральное обобщение метода Миттаг-Леффлера суммирует функцию в ее α-спиральной звезде Миттаг-Леффлера [8]. Для многомерного случая вариант теоремы Окада для случая звездных областей предложен в [13].

Там вместо функции $g(\lambda)=(1-\lambda)^{-1}$ в многомерном случае рассматривалась функция

$$\varphi(z)=(1-z_1-\ldots-z_n)^{-n}=$$
$$=\frac{1}{(n-1)!}\sum_{\|k\|\geq 0}\frac{(\|k\|+n-1)!z_1^{k_1}\ldots z_n^{k_n}}{k_1!\ldots k_n!},$$

которая при $n=1$ совпадает с g.

Использовать функцию φ для тестирования матричного метода не всегда удобно. Хотелось бы получить вариант теоремы Окада, который проверял бы матричный метод на геометрической прогрессии (одномерной), а позволял бы суммировать многомерные степенные ряды. Ниже предлагается теорема, которая частично решает эту проблему. Опишем класс одномерных методов суммирования, необходимых нам для построения многомерных методов.

Определение 3. Обозначим через S класс одномерных методов суммирования (полунепрерывных матричных методов)

$$T_\alpha=\left\{T_k^\alpha(\tau),\tau\in P\right\}$$

со следующими свойствами:

1. Функция

$$\Phi_\tau(\lambda)=\sum_{k=0}^{\infty}T_k^\alpha(\tau)\lambda^k$$

является целой для произвольного $\tau\in P,\lambda\in C$.

2. Матричный метод T_α суммирует геометрическую прогрессию

$$g(\lambda)=(1-\lambda)^{-1}=\sum_{k=0}^{\infty}\lambda^k$$

всюду в ее α-спиральной звезде Миттаг-Леффлера $G^\alpha_{(1-\lambda)^{-1}}$. То есть локально равномерно выполняется равенство

$$(1-\lambda)^{-1}=\lim_{\tau\to\tau_0}T_\tau*(1-\lambda)^{-1},\ \forall\lambda\in G^\alpha_{(1-\lambda)^{-1}}.$$

Произвольному матричному методу из класса S и $\forall x\in Q^n_>$ можно поставить в соответствие многомерный матричный метод по правилу

$$T_{(x;\alpha)}:=\left\{T^\alpha_{<k,m>}(\tau),\tau\in P\right\}, \qquad (5)$$

где $m=(m_1,\ \ldots,m_n)$ – первая целочисленная точка с положительными координатами, лежащая на луче, выходящем из нуля и проходящем через точку x.

Справедлива следующая теорема.

Теорема. Пусть функция f задана кратным степенным рядом (1), сходящимся в окрестности нуля в C^n; $x\in Q^n_>$; $G_f^{(x,\alpha)}$ – ее $(x_1,\ \ldots,x_n;\ \alpha_1,\ \ldots,\alpha_n)$-спиральная звезда Миттаг-Леффлера, и многомерный метод $T_{(x;\alpha)}$

построен по одномерному методу T_α из класса S по формуле (5). Тогда всюду в $G_f^{(x,\alpha)}$ метод $T_{(x;\alpha)}$ локально равномерно суммирует функцию f. То есть справедлива формула

$$f(z) = \lim_{\tau\to\tau_0} F^{\tau}_{(x;\alpha)}(z),\ \forall z \in G_f^{(x,\alpha)},$$

где

$$F^{\tau}_{(x;\alpha)}(z) = \sum_{\|k\|\geq 0} T^{\alpha}_{<k,m>}(\tau) a_{k_1\ldots kn} z_1^{k_1}\ldots z_n^{k_n}, \tau \in P$$

это композиция Адамара ряда (1) и ряда

$$T^{\tau}_{(x;\alpha)}(z) = \sum_{\|k\|\geq 0} T^{\alpha}_{<k,m>}(\tau) z_1^{k_1}\ldots z_n^{k_n}, \tau \in P.$$

Таким образом теорема справедлива для рациональных звезд Миттаг-Леффлера. Построить продолжение в случае произвольных звезд помогает следующее предложение.

Предложение. Для произвольного компакта K из ее $(x;\alpha)$ – спиральной звезды Миттаг-Леффлера $G_f^{(x,\alpha)}$ существует рациональная звезда $G_f^{(y,\alpha)}$, содержащая компакт K.

С помощью теоремы удобно конструировать многомерные матричные методы по одномерным. Приведем пример матричного метода суммирования, который строится с помощью одномерного метода и суммирует кратные ряды в звезде Миттаг-Леффлера.

Пример 2. Спиральный аналог метода Миттаг-Леффлера. $P = (0,1]; \tau_0 = 0,$

$$T^{\alpha}(\tau) = \left\{c_k^{\alpha}(\tau) = c^{\alpha}_{k_1\ldots k_n}(\tau), \tau \in P\right\} = \\ = \left\{\left(\Gamma(<k,m> \tau(1+i\alpha))\right)^{-1}\right\},$$

где Γ – гамма-функция Эйлера; $m \in N^n$. Опираясь на теорему, достаточно заметить, что метод $T^{\alpha}(\tau)$ суммирует геометрическую прогрессию в ее α-спиральной звезде.

К сожалению, суммировать такие методы могут кратные степенные ряды в спиральных звездах только с «когерентной» мнимой частью, т. е. при $\alpha_1 = \ldots = \alpha_n = \alpha$. С другой стороны, теорема позволяет восстанавливать функцию по ее значениям на достаточно «тонких» и даже дискретных множествах во всей спиральной звезде Миттаг-Леффлера.

Доказательство теоремы. Покажем регулярность метода. Так как одномерный метод регулярен и любой компакт из единичного круга лежит в α-спиральной звезде Миттаг-Леффлера функции $g(\lambda) = (1-\lambda)^{-1}$, то для любых $\delta > 0; r_0 \in (0,1)$ найдется окрестность $U(\tau_0)$ точки τ_0 такая, что $\forall \tau \in U(\tau_0)$ имеем

$$\left|\sum_{k=0}^{\infty} (T_k^{\alpha}(\tau) - 1)\lambda^k\right| < \delta; \forall |\lambda| < r_0 < 1.$$

Отсюда, воспользовавшись неравенствами Коши, получим

$$\left|(T_l^{\alpha}(\tau) - 1)\right| < \frac{\delta}{r_0^{\,l}}; \forall l = 0,1,2\ldots$$

Выберем произвольную точку $z = (z_1, \ldots, z_n)$ из области сходимости ряда (1). В силу свойств области сходимости ряда (1) найдется такое $r_0 \in (0,1)$, что точка $z\, r_0^{-m} = (z_1 r_0^{-m_1}, \ldots, z_n r_0^{-m_1})$ все еще будет лежать в области абсолютной сходимости ряда (1). Тогда $\forall \tau \in U(\tau_0)$ имеем

$$|f(z) - F^{\tau}_{(m;\alpha)}(z)| \leq \sum_{\|k\|\geq 0} |T^{\alpha}_{<k,m>}(\tau) - 1| \left|a_{k_1\ldots kn} z_1^{k_1}\ldots z_n^{k_n}\right| \leq$$

$$\leq \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{|<k,m>=l} \frac{\delta}{r_0^{\,l}} \left|a_{k_1\ldots kn} z_1^{k_1}\ldots z_n^{k_n}\right| =$$

$$= \delta \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{|<k,m>=l} \frac{z_1^{k_1}}{r_0^{\,l}} \left|a_{k_1\ldots kn}\right| \left|\frac{z_1}{r_0^{m_1}}\right|^{k_1} \ldots \left|\frac{z_n}{r_0^{m_n}}\right|^{k_n}.$$

Последний ряд сходится, так как точка $z\, r_0^{-m} = (z_1 r_0^{-m_1}, \ldots, z_n r_0^{-m_1})$ лежит в области абсолютной сходимости ряда (1). В силу произвольности δ убеждаемся в регулярности метода.

Для завершения доказательства теоремы, в силу теоремы Витали, достаточно показать равномерную ограниченность последовательности функций $F^{\tau}_{(m;\alpha)}(z)$ на произвольном компакте K из G. Обозначим через

$$D^{\delta} := \bigcup_{z\in D} B(z,\delta),$$

где $B(z,\delta) := \left\{\varsigma \in C^n : |\varsigma - z| < \delta\right\}$ – δ-раздутие области D.

Пусть

$$A_{\alpha} := \left\{\lambda \in C : \lambda = t^{(1+i\alpha)}; \forall t \in [0,1]\right\}, \delta > 0$$

и A_{α}^{δ} – δ-раздутие A_{α} в объединении с $U_{3\delta}(0)$-кругом, с центром в 0, радиуса 3δ:

$$B_{\delta}^{j} := \left\{zt^m = (zt^{m_1}, \ldots, zt^{m_n}) : z \in U_{r_0}(z^{(j)}),\ t \in A_{\alpha}^{\delta}\right\}.$$

Так как K компактно лежит в G и G открыто и $(x;\alpha)$-спирально, то найдется d точек $z^{(1)}, \ldots, z^{(d)} : \delta > 0$ и U_{r_0} такие, что

$$K \subset\subset \bigcup_{j=1}^{d} B_{\delta}^{j} \subset\subset G.$$

Теперь достаточно показать ограниченность $F^{\tau}_{(m;\alpha)}$ на B_{δ}^{j}. Справедлива интегральная формула

$$F^{\tau}_{(m;\alpha)}(z\lambda^m) = \frac{1}{2\pi i}\int\limits_{\partial A^{\delta}_{\alpha}} f(z_1u^{m_1},\ ...,z_nu^{m_n})\Phi_{\tau}\left(\frac{\lambda}{u}\right)\frac{du}{u} \quad (6)$$

при $\lambda \in A_{\alpha}$, $u \in \partial A^{\delta}_{\alpha}$, $z \in U_{r_0}(z^{(j)})$.

Действительно, так как $\partial A^{\delta}_{\alpha}$ – жорданов путь, а у подынтегральной функции особенности только в нуле, то стягивая его к нулю, разлагая функции в ряды и интегрируя, убеждаемся в истинности (6). При $\lambda \in A_{\alpha}$ и $u \in \partial A^{\delta}_{\alpha}$ точка $\frac{\lambda}{u}$ компактно лежит в α-спиральной звезде Миттаг-Леффлера $(1-\lambda)^{-1}$. Поэтому учитывая ограниченность функции *f* на B^{j}_{δ}, равномерная ограниченность $F^{\tau}_{(m;\alpha)}$ вытекает из стандартной оценки интеграла.

Теорема доказана.

Библиографические ссылки

1. Biberbach L. Analytische Fortsetzung. Springer-Verlag, Berlin, 1955. 240 p.
2. Mittag-Leffler G. Sur la representation d'une branche uniforme d'une fonction monogene // Acta Math. 1905. No. 29. P. 101–182.
3. Lindelof E. Sur l'application de la th´erie des residues au prolomgement analytique des s´eries de Taylor // J. Math. Pures Appl. 1903. No. 9(5). P. 213–221.
4. Le Roy E. Sur les series divergentes et les functions d´efines par un d´evelopement de Taylor // Ann. Fac. Sci. Univ. Toulouse. 1990. No. 2. P. 317–430.
5. Peyerimhoff A. Lectures on Summability. Lecture Notes in Math., Springer Verlag Berlin, 1970. 113 p.
6. Hardy G. H. Divergent series. Oxford, Clarendon Press, 1949. 503 p.
7. Кук Р. Бесконечные матрицы и пространства последовательностей. М. : Физматгиз, 1960. 474 с.
8. Аракелян Н. У. Об эффективном аналитическом продолжении степенных рядов // Матем. сб. 1984. Т. 124, № 5. С. 24–44.
9. Балашов С. К. О целых функциях вполне регулярного роста по кривым правильного вращения : дис. … канд. физ.-мат. наук. Ростов н/Д, 1972. 107 с.
10. Мураев Э. Б. Эйлеровское и борелевское суммирования рядов, их обобщения и приложения : дис. … докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1992. 364 с.
11. Downarovich M. Analytic continuation of series of homogeneous polynomicals of n complex variables. Prace Mat., 1975. 17 c.
12. Рамис Ж.-П. Расходящиеся ряды и асимптотические теории. М. ; Ижевск : Инст. комп. исслед., 2002. 80 с.
13. Яковлев Е. И. Об аналитическом продолжении кратного степенного ряда с помощью *m*-однородных полиномов матричным методом в обобщенную звезду Миттаг-Леффлера // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 4(50). С. 87–92.
14. Arakelian N. H. Efficient harmonic continuation of the Laplace series // *J. Contemp. Mathemat. Anal.* 2012. Vol. 47, no. 3. P. 105–123.
15. Яковлев Е. И. Аналог теоремы Окада // Вестник КрасГУ. 2006. № 9. С. 111–113.

References

1. Biberbach L. *Analytische Fortsetzung*, Springer-Verlag, Berlin, 1955, 240 p.
2. Mittag-Leffler G. Sur la representation d'une branche uniforme d'une fonction monogene*, Acta Math.* 1905, no. 29, p. 101–182.
3. Lindelof E. Sur l'application de la th´erie des residues au prolomgement analytique des s´eries de Taylo. *J. Math. Pures Appl.* 1903, no. 9, p. 213–221.
4. Le Roy E. Sur les series divergentes et les functions d´efines par un d´evelopement de Taylor. *Ann. Fac. Sci. Univ.* Toulouse. 1990, no. 2, p. 317–430.
5. Peyerimhoff A. Lectures on Summability, Lecture Notes in Math., Springer Verlag, 1970, 113 p.
6. Hardy G. H. *Divergent series*. Oxford, Clarendon Press, 1949, 503 p.
7. Cooke R. G. *Infinite matrices and sequence spaces*. London, Macmillan, 1960, 473 p.
8. Arakelyan N. U. [On efficient analytic continuation of power series]. *Mathematics of the USSR-Sbornik,* 1984, vol. 124, no. 5, p. 24–44 (In Russ.)
9. Balashov S. C. *O celih funkciyah vpolne regulyarnogo rosta po krivim pravilnogo vrachjeniya. Dis. cand. phis.-mat. nauk* [On entire functions of completely regular growth along curves right rotation]. Rostov-na-Donu, 1972, 107 p.
10. Muraev E. B. *Eulerovscoe i borelevskoe summirovanie ryadov, ih obobshjeniya i prilojeniya. Dis. doct. phis.-mat. nauk.* [Euler and Borel summation of the series, their generalizations and applications. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Novosibirsk, 1992. 364 p.
11. Downarovich M. Analytic continuation of series of homogeneous polynomicals of n complex variables. Prace Mat., 1975. p. 17.
12. Ramis J.-P. *Raskhodyashchiyesya ryady i asimptoticheskiye teorii* [Divergent series and asymptotic theory]. Moscow–Ijevsk, Inst. comp. issl. Publ., 2002, 80 p.
13. Yakovlev E. I. [The analogue of theorem Okada]. *Vestnik SibGAU,* 2013, no. 4 (50), p.87–92. (In Russ.)
14. Arakelian N. H. Efficient harmonic continuation of the Laplace series, *J. Contemp. Mathemat. Anal*, 2012, Vol. 47, no. 3, p.105–123.
15. Yakovlev E. I. [About the analytic continuation of the multiple power series using m-homogeneous polynomial matrix method in the generalized star Mittag-Leffler]. *Vestnik KrasGU*, 2013, no. 9, p. 111–113. (In Russ).

© Яковлев Е. И., 2014

Раздел
Part
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

УДК 629.78.01

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 178–184

БАЛАНСИРОВКА НЕКОТОРЫХ АГРЕГАТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. Г. Крушенко[1], В. В. Голованова[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: genry@icm.krasn.ru
[2]Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. Ф. Фрунзе
Российская Федерация, 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3
E-mail: vasilin-a@rambler.ru

В космических аппаратах, к которым относятся как средства выведения на орбиту и функционирования в космосе – двигатели, так и искусственные спутники различного назначения, имеются детали, узлы и агрегаты, работающие в режиме вращения, а следовательно, испытывающие воздействие центробежных сил. И в случае неуравновешенности материала, из которых они изготовлены, или комплектующих деталей относительно оси вращения, в процессе эксплуатации соответствующих объектов они могут выйти из строя в результате дисбаланса, что может нарушить рабочий режим или даже привести к выходу из строя космического аппарата. В качестве примеров предотвращения негативных последствий дисбаланса объектов космических аппаратов рассмотрены технологии балансировки: а) вращающихся деталей турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя; б) электронасосного агрегата космического аппарата, предназначенного для обеспечения регламентных температурных режимов космического аппарата. Такие объекты изучения выбраны не случайно, а в связи с тем, что ротор турбонасосного агрегата с расположенными на нем рабочими колесами работает максимум десятки секунд/минут либо непрерывно, либо в циклическом режиме при высокой частоте вращения – вплоть до 100 000 об/мин. Что касается электронасосных агрегатов, то они должны обеспечивать температурный режим искусственных спутников значительно более длительное время – вплоть до 15 лет.

Ключевые слова: космические аппараты, турбонасосные агрегаты, жидкостный ракетный двигатель, электронасосный агрегат, балансировка.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 178–184

SOME UNITS SPACECRAFT BALANCING

G. G. Krushenko[1], V. V. Golovanova[2]

[1]Institute of Computational Modeling SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru
[2]Design Bureau “Arsenal” named after M. V. Frunze
1-3, Komsomol St., Saint-Petersburg, 195009, Russian Federation
E-mail: vasilin-a@rambler.ru

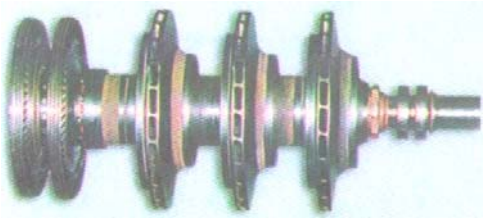
Spacecrafts, which include, as a means of launching into orbit and functioning in space – engines, and artificial satellites for various purposes, are components, subassemblies, and assemblies operating in the mode of rotation, and, therefore, affected by the centrifugal forces. And, in the case of unbalance of the material from which they are made, or components relative to the axis of rotation, during operation of the corresponding objects they may be damaged as a result of imbalances that may disturb the working mode or even lead to failure of the spacecraft. In the present work as examples of negative consequences prevent of the imbalance of interest spacecraft, the technology considered balancing and rotating parts turbo-pump assembly of liquid-propellant rocket engine, and b) the electric pump unit of the spacecraft, designed to ensure the maintenance of the temperature modes of the spacecraft. Such objects of study chosen, and due to the fact that the turbo-pump rotor assembly located on it impellers operate a maximum of tens of seconds/minutes either continuously or cyclically at high speed – up to 100000 rpm, they must ensure that the temperature regime of artificial satellites for a much longer time – up to 15 years.

Keywords: spacecrafts, turbo-pump assembly, liquid propellant rocket engine, electro-pump unit, balancing.

Введение. В космических аппаратах (КА), к которым относятся как средства выведения на орбиту и функционирования в космосе – двигатели, так и искусственные спутники различного назначения, имеются детали, узлы и агрегаты, работающие в режиме вращения, а следовательно, испытывающие воздействие центробежных сил. И в случае неуравновешенности материала, из которых они изготовлены, или комплектующих деталей относительно оси вращения, в процессе эксплуатации соответствующих объектов они могут выйти из строя в результате дисбаланса, что может нарушить рабочий режим или даже привести к выходу из строя КА. В настоящей работе в качестве примеров предотвращения негативных последствий дисбаланса объектов КА рассмотрены технологии балансировки: а) вращающихся деталей турбонасосного агрегата (ТНА) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) [1]; б) электронасосного агрегата (ЭНА) КА, предназначенного для обеспечения регламентных температурных режимов КА [2].

В ЖРД подача компонентов топлива – окислителя и горючего – в камеру сгорания осуществляется насосами, которые приводятся во вращение газовой турбиной. В совокупности насосы с газовой турбиной образуют единый энергетический узел – ТНА, являющийся одним из основных агрегатов ракетного двигателя [3; 4].

Такие объекты изучения выбраны не случайно, а в связи с тем, что ЖРД разных ступеней, а следовательно, и ротор с расположенными на нем рабочими колесами (РК) ТНА (рис. 1), работают максимум десятки секунд/минут либо непрерывно, либо в циклическом режиме при высокой частоте вращения, например в составе РД-0120 (рис. 1) – до 50 000 об/мин [5]. Имеются разработки ТНА с частотой вращения ротора свыше 100 000 об/мин [6], что в еще большей степени повышает требования к качеству комплектующих деталей. Что касается ЭНА, то они должны обеспечивать температурный режим искусственных спутников значительно более длительное время – вплоть до 15 лет [7].



а

б

в

Рис. 1. Ротор турбонасосного агрегата ЖРД РД-0120 [5] (*а*); рабочие колеса (*б, в*)

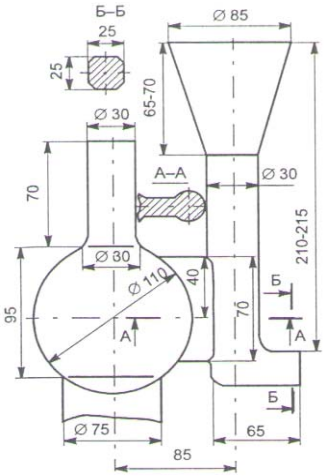
Повышение качества рабочих колес. РК ТНА представляют собой цельнолитые диски с открытыми (рис. 1, *б*) или закрытыми (рис. 1, *в*) радиально расположенными лопатками сложной криволинейной формы. РК изготовляют методом литья по выплавляемым моделям [8] из жаропрочных сплавов на никелевой основе [9]. Технология изготовления РК относится к способу изготовления деталей литьем по выплавляемым моделям и укрупненно включает в себя изготовление из легкоплавких материалов (парафиново-стеариновая смесь и др.) модели будущей отливки (так называемая выплавляемая модель), изготовление по этой модели литейной керамической формы, выплавление из керамической формы модельной массы, т. е. изготовление литейной формы – оболочки, и заполнение ее сплавом. После отрезки литниково-питающей системы (ЛПС) от отливки ее подвергают многоступенчатому контролю, начиная от визуального осмотра и вплоть до рентгенопросвечивания.

Ввиду того, что к качеству РК предъявляются высокие требования, происходит их значительная отбраковка на каждой контрольной операции в результате выявления целого ряда дефектов [10], и к тем, которые могут повлиять на дисбаланс детали, относятся пустоты в виде раковин газового и усадочного происхождения, а также ликвации сплава и качество поверхности оболочки. Применение «простых» технологических мероприятий не во всех случаях приводило к положительным результатам, что, по-видимому, можно объяснить незнанием всех факторов, определяющих качество отливок, в связи с чем был выполнен ряд исследований по повышению качества РК.

С целью установления причин возникновения дефектов и принятия мер по их предотвращению, было проведено исследование с применением метода экспертных оценок [11], основанного на априорном выявлении значения («веса») влияния отдельных факторов на возникновение тех или иных дефектов, что определяли на основании опыта специалистов, накопленного ими в предшествующей деятельности. В результате выполненного исследования было установлено, что на 8 выявляемых дефектов, среди которых фигурировали и дефекты типа пустот, предположительно влияет 21 фактор [12].

На основании обработки полученных данных была разработана конструкция ЛПС, характеризующаяся наличием шаровой прибыли со щелевым подводом в нее металла (рис. 2.) [13]. Такая форма прибыли обладает наибольшей эффективностью в отношении питания – подвода жидкого металла к кристаллизующимся объемам отливки [14], что объясняется ее минимальной поверхностью охлаждения, т. е. минимально возможной потерей металлом тепла. Функция вертикальной щелевой ЛПС заключается в исключении возможного разрушения оболочки в результате динамического воздействия струи металла при заливке. В нижней части стояка ЛПС было устроено ответвление для гашения удара первой порции струи заливаемого металла. Такое устройство ЛПС предотвратило возникновение таких дефектов, как недолив

лопаток, межлопаточные прорывы керамической формы (на что положительно повлияло и повышение качества оболочек [15]), усадочные рыхлоты, трещины, надрывы, газовые раковины и др.



а

б

Рис. 2. Чертеж разработанной ЛПС (*а*), отливка РК с ЛПС по рис. 2, *а* (*б*)

Повышение качества литейной формы (оболочки). Качество поверхности металлических деталей, включая и отливки, отвечает за целый ряд рабочих характеристик механизмов, в состав которых они входят. Что касается РК, то качество, чистота их поверхности определяет массовую производительность ТНА. При этом качество поверхности дисков зависит от состава модельной массы, применяющейся для изготовления выплавляемых моделей – прототипов будущей отливки. В настоящей работе с применением указанного выше метода математического планирования эксперимента [16], при реализации которого в качестве параметра оптимизации были приняты прочностные показатели, проведено исследование по разработке нового состава модельной массы. Это связано с тем, что содержащийся в ее стандартном составе стеарин (стеарин + парафин в соотношении 50/50), взаимодействует со связующим (гидролизованный раствор этилсиликата), образуя на поверхности модели неровности, шероховатости и другие дефекты, которые передаются поверхностям отливок. Кроме того, стандартный состав обладает низкой теплопроводностью, что приводит к деформации моделей при нарушении температурного режима их хранения и, как следствие, к нарушению геометрии отливок, что может привести к их дисбалансу в процессе работы. Разработанная модельная масса [15; 17] (60 % парафина, 17 % буроугольного воска и 23 % пчелиного воска) характеризуется повышенными свойствами (первая цифра – стандартная масса, вторая – разработанная: временное сопротивление на изгиб $\sigma_{изг}$ – 50/100 МПа; временное сопротивление разрушению $\sigma_в$ – 10/28 МПа; температура каплепадения – 47,0/79,5 ºС; содержание золы – 0,04/0 %; теплостойкость до 35–40 ºС), которые обеспечивают получение отливок с чистотой поверхности требуемого качества.

Разработанные мероприятия в виде применения измененной ЛПС и новой модельной массы обеспечили 100%-ную годность отливок по рентгеновскому контролю и уменьшили в 2,5–3 раза отсев на других контрольных операциях при одновременном уменьшении расхода дорогостоящего сплава до 3-х кг на одну отливку. При этом была использована технология электрошлакового переплава отделенного от отливок диска ЛПС, что позволило получать металл повышенного качества, предоставляя возможность его использования взамен первичной шихты, что также дает экономический эффект.

Балансировка вращающихся деталей ТНА. В связи с тем, что ТНА играет определяющую роль в обеспечении безаварийной работы ЖРД, а следовательно, и КА, балансировке вращающихся деталей и узлов этого агрегата придается первостепенное значение. Устройство для балансировки и технология подробно описаны, например, в совместной публикации [18] специалистов ракетно-космической отрасли – российского ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики В. С. Рачука» (Rachuk V. S. – генеральный директор, генеральный конструктор ОАО «КБХА») и американской фирмы Pratt-Whitney Rocketdyne (Buser M. и Minick A.). Существует достаточно большое количество патентов для проведения балансировки роторов ТНА ЖРД. К ним относится, например, патент РФ № 2204739 [19], ценность которого заключается в том, что его авторы являются специалистами ОАО «КБХА».

Согласно работе [6], написанной специалистами ракетно-космической отрасли, в производстве ТНА применяется два вида балансировки вращающихся деталей и узлов этого агрегата. Статистическая – для центробежных и осевых колес, импеллеров, дисков турбин, зубчатых колес и других составных частей ротора в качестве предварительной. И заключается она в использовании комплекса технологических операций по определению места и установки балансировочных грузов с целью уменьшения главного вектора дисбалансов невращающегося ротора с определением массы балансировочного груза как методом подбора без пробных масс, так и с пробной массой. После

статической проводится динамическая балансировка. Статическую балансировку ротора ТНА в сборе не проводят, так как при этом не выявляется моментная неуравновешенность ротора с деталями, распределенными в осевом направлении. Окончательная, динамическая, балансировка основана на установлении взаимосвязи реакций в опорах вращающегося ротора с дисбалансом масс и включает целый ряд операций, конечная цель которых заключается в определении положения и массы балансировочных грузов, в их установке (или удалении) на ротор с целью уменьшения дисбаланса до регламентируемого технической документацией. Для выполнения операций динамической балансировки применяются балансировочные станки, описание которых приведено в этой же монографии [6].

Балансировка электронасосных агрегатов. Для успешного выполнения задач, поставленных перед КА, требуется высокоточная информация по определению и прогнозированию параметров их орбит с целью корректировки в случае необходимости. Следует при этом отметить, что современные знания о гравитационном поле нашей планеты и о движении планет Солнечной системы позволяют с высокой точностью учитывать влияние гравитационных сил, действующих на КА [20]. Однако ошибки определения и прогнозирования параметров движения КА возникают, как правило, из-за неадекватного учета других возмущающих факторов, обусловленных работой бортовых систем КА, что связано с их конструктивными и функциональными особенностями [21].

К таким бортовым системам относятся и ЭНА, которые предназначены для обеспечения регламентных температурных режимов КА [2; 22; 23]. К этим агрегатам предъявляются достаточно жесткие требования по минимизации габаритов, а следовательно, и связанных с ними масс, а также по увеличению ресурса и КПД. В настоящее время в космическом машиностроении применяются высокоскоростные малорасходные ЭНА, которые характеризуются относительно низкими величинами подачи рабочей жидкости [24]. В частности, к таким агрегатам относится и агрегат, описанный в патенте РФ № 2290540 [25]. Причем, что отмечалось еще в 90-е гг. прошлого века в диссертационной работе одного из авторов указанного патента В. В. Двирного [26] и что оказалось актуальным и в наше время, основным фактором, влияющим на длительную непрерывную работу высокоскоростных малорасходных нагнетателей, является балансировка.

ЭНА представляют собой электрические двигатели постоянного тока с бесщеточным коллектором в блоке с насосом и частотой вращения от 400 до 1000 рад/с. При низкой мощности и высоком ресурсе работы системы такой привод единственно приемлемый. Турбинный привод используется в системах с низким ресурсом работы. Рабочим телом турбины служит жидкость (гидротурбина) или воздух или продукты сгорания топлива (газовая турбина). Турбина с малой массой конструкции обеспечивает высокую мощность и угловую скорость при непосредственном соединении с ротором лопаточного насоса. При специальных компонентах топлива масса системы определяется временем ее работы. Турбины имеют высокую скорость вращения и подлежат тщательной балансировке. Так как малорасходные нагнетатели балансируют по виброскорости на частоте вращения, то этот параметр играет решающую роль при балансировке [20; 27].

Для балансировки малорасходных нагнетателей по виброскорости (виброскорость показывает максимальную скорость перемещения контролируемой точки оборудования в процессе ее прецессии, измеряется в мм/с) на частоте вращения определяются места установки вибродатчиков или люлек балансировочного станка. На рис. 3 [25] представлен разрез полукомплекта ЭНА, который содержит электродвигатель 2, при этом ротор электродвигателя 7 находится в гильзе, которая через биметаллическую вставку 12 герметично соединена сваркой 11 с корпусом 2. Балансировку проводят до нанесения сварочного шва 3. Металл в тяжелом месте снимают высверливанием с одновременным отсосом стружки пылесосом. Съем металла производится со специального пояска рабочего колеса 4, который образует разгрузочную от осевых усилий камеру. Полукомплект ЭНА устанавливают на люльки балансировочного станка напротив переднего и заднего шарикоподшипника 5, находящихся между статорной обмоткой 10 и датчиком положения ротора 6, 8. Места установки отмечают краской. На эти же отметки устанавливают электродвигатель без крыльчатки для определения его виброскорости на частоте вращения.

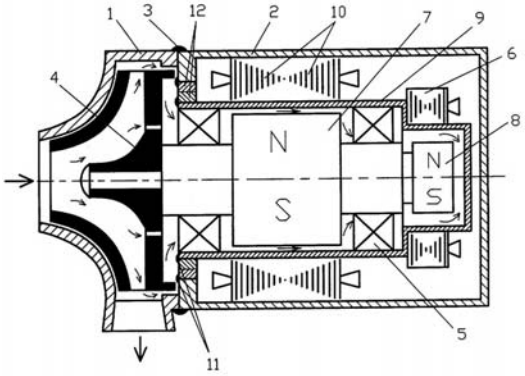


Рис. 3. Полукомплект ЭНА [25]

Контроль виброскорости электродвигателей по результатам измерений вибраций на невращающихся частотах проводят по ГОСТ ИСО 108-16-1–97. Вибросостояние электродвигателей определяется в двух взаимно перпендикулярных направлениях относительно продольной оси по двум значительным составляющим вибрации, определяющим виброскорости между максимальным и минимальным значениями с последующим определением среднеквадратического значения вибрации. Среднеквадратичные значения вибраций на партии выбранных электродвигателей по вышеуказанной методике составили от 0,45 до 1,12 мм/с.

Норма для балансировки ЭНА назначена таким образом, чтобы нагрузка на валу по виброскорости не превышала виброскорости самого электродвигателя на частоте вращения более чем на 10 %. Основное требование к ЭНА – получение длительного срока непрерывной работы (СНР) в орбитальных условиях, поэтому кроме воздействия на ЭНА несбалансированных масс необходимо учитывать и воздействие других факторов. В космосе, в условиях невесомости, радиальные нагрузки уменьшаются на массу ротора (порядка 200 г), при этом ресурс подшипников, подсчитанный по вышеуказанной методике, увеличивается примерно в два раза. Согласно принципам ускорения ресурсных испытаний не должны изменяться физические условия работы в режимах ускорений. Для ЭНА такая опасность имеется, поскольку при высоких скоростях вращения в поле сил тяжести шарики шарикоподшипников выходят на режим глиссирования. Для получения устойчивого движения шариков в невесомости в конструкциях электродвигателя, опоры смещают относительно цилиндрического магнитопровода в радиальном направлении на величину, равную 0,1–0,9 величины среднего воздушного зазора между статором и ротором, благодаря чему возникает сила одностороннего магнитного притяжения (меньше веса ротора), обеспечивающая устойчивую и надежную работу при отсутствии сил тяжести на орбите и вертикальном положении.

Заключение. При балансировке ЭНА по виброскорости на частоте вращения электродвигатель с рабочим колесом помещают на две люльки по тем же меткам, что и при измерении виброскорости электродвигателя без рабочего колеса, и прижимают к люльке резиновыми бандажами. Люльки соединены ступенчатыми цилиндрическими тягами с индукционными датчиками, сигнал с которых поступает на усилитель и решающее устройство, которое на стрелочный прибор или монитор компьютера выводит значение виброскорости на частоте вращения. По метке на рабочем колесе с помощью стробоскопа определяют тяжелое место, которое оказывается внизу, и в этом месте с помощью боринструмента удаляют металл с отсосом стружки пылесосом. Такая методика хорошо зарекомендовала себя и подтверждена, например, успешной эксплуатацией телекоммуникационного космического аппарата SESAT – первого спутника, созданного ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» для зарубежного оператора совместно с Thales Alenia Space [28] и запущенного в 2010 году, и приемлема для балансировки других КА.

Библиографические ссылки

1. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 488 с.

2. Бобков А. В. Центробежные насосы систем терморегулирования космических аппаратов. Владивосток : Дальнаука, 2003. 217 с.

3. Чванов В. К., [и др.]. Турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО «Энергомаш» // Конверсия в машиностроении. 2006. № 1. С. 15–21.

4. Seong Min Jeon [et al.]. Rotordynamic analysis of a high thrust liquid rocket engine fuel (Kerosene) turbopump // Aerospace Science and Technology. 2013. Vol. 26, Iss. 1. P. 169–175.

5. Прочность и ресурс ЖРД / Н. А. Махутов [др.]. М. : Наука, 2011. 525 с.

6. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / Моисеев В. А. [др.]. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 381 с.

7. Пат. 2402464 Российская Федерация, МПК C1 B64G1/50. Способ испытаний на ресурс центробежного электронасосного агрегата системы терморегулирования космического аппарата / Халиманович В. И., Загар О. В., Леканов А. В. и др. Заяв. № 2009122164/11 от 09.06.2009. Бюл. № 30. 2010.

8. Оборин Л. А. Научно-технологические основы производства литых деталей по выплавляемым моделям для силовых установок летательных аппаратов / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 238 с.

9. Крушенко Г. Г., Решетникова С. Н. Применение жаропрочных сплавов для получения литых деталей двигателей летательных аппаратов // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники : материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. С. 119–121.

10. Кокшаров И. И. [и др.]. Анализ отливок методом экспертных оценок // Заводская лаборатория. 2000. Т. 66, № 5. С. 64–66.

11. Haase T., Termath W., Martsch M. How to Save Expert Knowledge for the Organization: Methods for Collecting and Documenting Expert Knowledge Using Virtual Reality based Learning Environments // Procedia Computer Science. 2013. Vol. 25. P. 236–246.

12. Резанова М. В., Крушенко Г. Г. Некоторые технологии повышения качества литых деталей двигателей // Наука. Промышленность. Оборона «НПО-2013» : XIV Всерос. науч.-техн. конф. для студентов, аспирантов и молодых ученых. Новосибирск : Новосиб. гос. техн. ун-т, 2013. С. 536–540.

13. Крушенко Г. Г., Буров А. Е. Влияние литниково-питающих систем на механические свойства литых деталей транспортных средств // Технология машиностроения. 2007. № 12. С. 12–15.

14. Василевский П. Ф. Технология стального литья. М. : Машиностроение, 1974. 408 с.

15. Крушенко Г. Г. [и др.]. Модельная масса для получения отливок из жаропрочных сплавов // Литейное производство. 2002. № 4. С. 18.

16. Gunasegaram D. R., Farnsworth D. J., Nguyen T. T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments // J. of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209, Iss. 3. P. 1209–1219.

17. Крушенко Г. Г. [и др.]. Совершенствование технологии изготовления цельнолитого ротора из жа-

ропрочных сплавов // Технология машиностроения. 2002. № 3. С. 39–40.

18. Rachuk V. S. [et al.]. Single Shaft Turbopump Expands Capabilities of Upper Stage Liquid Propulsion // 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (21–23 July 2008). Hartford, American Institute of Aeronautics and Astronautics. 15 p. URL: http://www.lpre.de/resources/articles/ AIAA-2008-4946.pdf (дата обращения: 10.08. 2014).

19. Пат. 2204739 Российская Федерация, С2 МПК[7] F04D29/66. Устройство для балансировки ротора высокооборотной турбомашины / Гадаскин Л. А., Дмитренко А. И., Попов В. Н. Заяв. № 2000112283/06 от 17.05.2000; опубл. 20.05.2003.

20. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

21. Захваткин М. В. Определение и прогнозирование параметров движения космического аппарата с учетом возмущений, вызванных работой бортовых систем // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. 2014. № 45. 30 с.

22. Вейнберг Д. М. [и др.]. Уникальные электромеханические бортовые системы орбитальной космической станции «Мир». М. : Наука, 2001. 55 с.

23. Бобков А. В., Каталажнова И. Н. Сравнительный анализ методик расчёта центробежных насосов в приложении к малоразмерным конструкциям авиакосмического назначения // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 1. С. 307–309.

24. Двирный В. В., Пискулина М. А., Плотников К. О. Инновации в области агрегатов систем терморегулирования космических аппаратов // Интеллект и наука : Тр. XIV Всерос. конф. Железногорск, 2014. С. 8–10.

25. Пат. 2290540 Российская Федерация, РФ С1 F04D 13/06 F04D 29/02. Электронасосный агрегат / Двирный В. В., Леканов А. В., Халиманович В. И. и др. Заяв. № 2005114553/06 от 13.05.2005. Бюл. № 36. 2006.

26. Двирный В. В. Технологические особенности агрегатов автоматики систем терморегулирования космических аппаратов с длительным сроком активного существования : дис. … канд. техн. наук // САА. Красноярск, 1993.

27. Агрегаты автономных энергетических систем : учеб. пособие / Е. Н. Головёнкин [и др.]. Красноярск : КрПИ, 1986. 89 с.

28. Спутниковые телекоммуникации. Информационные спутниковые системы. 2010. № 10. С. 8–10.

References

1. Dobrovol'skij M. V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli. Osnovy proektirovanija: Uchebnik dlja vuzov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Liquid-propellant rocket engines. Design basis: Textbook for universities. 2nd ed., Rev. and supplementary]. Moscow, Izd-vo MGU im. N. Je. Baumana, 2005, 488 p.

2. Bobkov A. V. *Centrobezhnye nasosy sistem termoregulirovanija kosmicheskih apparatov* [Centrifugal pumps systems of spacecraft thermal control]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2003, 217 p.

3. Chvanov V. K., Kashkarov A. M., Romasenko E. N. et al. [Turbopump units LRE design NPO Energomash]. *Konversija v mashinostroenii*, 2006, no. 1, p. 15–21.

4. Seong Min Jeon et al. Rotordynamic analysis of a high thrust liquid rocket engine fuel (Kerosene) turbopump. *Aerospace Science and Technology*, April–May 2013, Vol. 26, Issue 1, P. 169–175.

5. Mahutov N. A., Rachuk V. S., Gadenin M. M. et al. *Prochnost' i resurs ZhRD*. [Strength and resource LRE]. Moscow, Nauka Publ., 2011, 525 p.

6. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A. et al. *Tehnologija proizvodstva zhidkostnyh raketnyh dvigatelej* [Production technology of liquid rocket engines]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2008, 381 p.

7. Halimanovich V. I., Zagar O. V., Lekanov A. V. i dr. *Sposob ispytanij na resurs centrobezhnogo jelektronasosnogo agregata sistemy termoregulirovanija kosmicheskogo apparata* [Method of testing resource centrifugal electric pump unit of the thermal control system of the spacecraft]. Patent RF, no. 2402464, 2010.

8. Oborin L. A. *Nauchno-tehnologicheskie osnovy proizvodstva lityh detalej po vyplavljaemym modeljam dlja silovyh ustanovok letatel'nyh apparatov* [Scientific and technological basis of production of cast parts casting for power plants of aircraft]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2013, 238 p.

9. Krushenko G. G., Reshetnikova S. N. The use of heat-resistant alloys to obtain castings of aircraft engines. [Primenenie zharoprochnyh splavov dlja poluchenija lityh detalej dvigatelej letatel'nyh apparatov]. *Problemy razrabotki, izgotovlenija i jekspluatacii raketno-kosmicheskoj i aviacionnoj tehniki Materialy VI Vseros. nauchno-tehnicheskoj konferencii* [Problems of design, manufacture and operation of aerospace and aeronautical engineering]. Omsk, Publishing house of Omsk state technical University, 2011, p. 119–121.

10. Koksharov I. I., Krushenko G. G., Torshilova S. I. i dr. [Analysis of the castings, the method of expert estimates]. *Zavodskaja laboratorija*, 2000, vol. 66, no. 5, p. 64–66. (In Russ.)

11. Haase T., Termath W., Martsch M. How to Save Expert Knowledge for the Organization: Methods for Collecting and Documenting Expert Knowledge Using Virtual Reality based Learning Environments. *Procedia Computer Science*, 2013, vol. 25. p. 236–246.

12. Rezanova M. V., Krushenko G. G. Some technologies of the improvement of the quality of cast parts engines [Nekotorye tehnologii povyshenija kachestva lityh detalej dvigatelej]. *XIV Vseros. nauchno-tehnich. konf. dlja studentov, aspirantov i molodyh uchenyh "Nauka. Promyshlennost'. Oborona «NPO-2013"* [XIV the age of three. scientific-technical. proc. for students, postgraduates and young scientists "Science. Industry. Defence NGO-2013". Novosibirsk, Novosibirsk

state technical University Publ., 2013, p. 536–540. (In Russ.)

13. Krushenko G. G., Burov A. E. [The influence of feeding gate systems on the mechanical properties of cast parts vehicles]. *Tehnologija mashinostroenija,* 2007, no. 12, p. 12–15. (In Russ.)

14. Vasilevskij P. F. *Tehnologija stal'nogo lit'ja* [The technology of steel castings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 408 p.

15. Krushenko G. G., Mishin A. S., Bonchenkov A. A. et al. [Model material for castings made of heat-resistant alloys]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2002, no. 4, p. 18. (In Russ.)

16. Gunasegaram D. R., Farnsworth D. J., Nguyen T. T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 1 February 2009, Vol. 209, Issue 3, P. 1209–1219.

17. Krushenko G. G., Mishin A. S., Bonchenkov A. A. et al. [The technology of solid rotor of heat-resistant alloys]. *Tehnologija mashinostroenija*. 2002, no. 3, p. 39–40. (In Russ.)

18. Rachuk V. S., Dmitrenko A. I., Buser M. et al. Single Shaft Turbopump Expands Capabilities of Upper Stage Liquid Propulsion. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 21-23 July 2008, Hartford, American Institute of Aeronautics and Astronautics. 15 p. Available at: http://www.lpre.de/resources/articles/AIAA-2008-4946.pdf. (accessed 10.08.2014).

19. Gadaskin L. A., Dmitrenko A. I., Popov V. N. *Ustrojstvo dlja balansirovki rotora vysokooborotnoj turbomashiny* [Device for balancing of high-speed rotor of a turbomachine]. Patent RF, no. 2204739, 2003.

20. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovanija kosmicheskih apparatov informacionnogo obespechenija: ucheb. posobie.* [Principles of design of spacecraft information support: textbook. manual], Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011, 488 p.

21. Zahvatkin M. V. [Determination and prediction of motion parameters of the spacecraft taking into account the perturbations caused by the operation of onboard systems]. *Preprint IPM im. M.V. Keldysha*, 2014, no. 45, 30 p. (In Russ.)

22. Vejnberg D. M., Vereshhagin V. P., Miroshnik O. M. et al. *Unikal'nye jelektromehanicheskie bortovye sistemy orbital'noj kosmicheskoj stancii "Mir".* [Unique electro-mechanical on-Board system orbital space station "Mir"]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 55 p.

23. Bobkov A. V., Katalazhnova I. N. [Comparative analysis of methods of calculation of centrifugal pumps in application to small-size structures aerospace]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 1, p. 307–309. (In Russ.)

24. Dvirnyj V. V., Piskulina M. A., Plotnikov K. O. [Innovation units systems thermoregulatory spacecraft]. *Intellekt i nauka: trudy XIV Vseroscijskoj konferenci* [Intellect and science: proceedings of the XIV all-Russian conference]. Zheleznogorsk, 2014, p. 8–10. (In Russ.)

25. Dvirnyj V. V., Lekanov A. V., Halimanovich V. I. et al. *Jelektronasosnyj agregat* [Electropump unit]. Patent RF, no. 2290540, 2006.

26. Dvirnyj V. V. *Tehnologicheskie osobennosti agregatov avtomatiki sistem termoregulirovanija kosmicheskih apparatov s dlitel'nym srokom aktivnogo sushhestvovanija. Dis. kand. tekh. nauk.* [Technological features of aggregates automation systems thermal control of spacecraft with a long lifetime]. Diss. Cand.. techn. Sci. CAA, 1993.

27. Golovjonkin E. N., Dvirnyj V. V., Kovaljov N. A. i dr. *Agregaty avtonomnyh jenergeticheskih sistem. Ucheb. Posobie*. [The units stand-alone power systems. The textbook. manual]. Krasnoyarsk, KrPI Publ., 1986, 89 p.

28. [Satellite telecommunications] *Informacionnye sputnikovye sistemy*, 2010, no. 10, p. 8–10. (In Russ.)

© Крушенко Г. Г., Голованова В. В., 2014

УДК 629.78.01

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 185–189

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. Г. Крушенко[1], В. В. Голованова[2]

[1]Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: genry@icm.krasn.ru
[2]Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. Ф. Фрунзе
Российская Федерация, 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3
E-mail: vasilin-a@rambler.ru

Основными показателями качества космических аппаратов (КА) является их надежность и срок активного существования (САС) на орбите, и существенную роль в этом играет температурный режим внутри объема КА, где находятся приборы. Одна из позиций их стабильной работы заключается в создании определенного теплового режима в объеме конструкции, для чего служит система терморегулирования, при которой тепловой режим обеспечивается с помощью вентилятора, включающегося от термореле при заданной температуре. При этом циркулирующий в системе терморегулирования жидкий теплоноситель, например азот, осуществляет передачу тепла от «холодной» поверхности спутника, излучавшей избыток тепла в космическое пространство. При понижении температуры рабочего тела ниже заданной вентилятор выключается, что приводит (в отсутствие конвекции) к значительному увеличению теплового сопротивления между радиационной поверхностью и внутренним объемом поверхности корпуса, в результате, предотвращается дальнейшее снижение температуры. В результате совершенствования системы терморегулирования, наряду с совершенствованием других систем жизнеобеспечения, САС спутников к настоящему времени превышает 10 лет, а к 2016 году намечен САС до 15 лет.

Ключевые слова: космические аппараты, срок активного существования на орбите, температурный режим.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 185–189

PERFECTION OF CONTROL SYSTEMS OF SPACE VEHICLES

G. G. Krushenko[1], V. V. Golovanova[2]

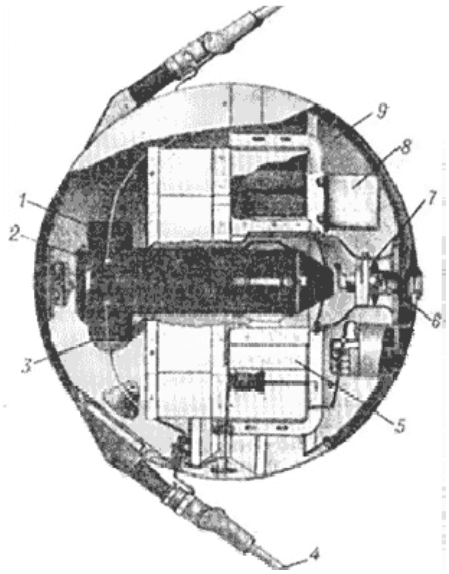
[1]Institute of Computational Modeling SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru
[2]Design Bureau “Arsenal” named after M. V. Frunze
1-3, Komsomol St., Saint-Petersburg, 195009, Russian Federation
E-mail: vasilin-a@rambler.ru

The main indicators of the quality of space vehicles (SV) are their reliability and lifetime (LT) in the orbit, and a significant role in this plays a temperature mode inside of SV, where are the devices. And one of their stable work is to create a specific thermal regime in the volume of construction, what is the thermal control system in which the heat mode is provided with fan provided by thermal relay at a given temperature. The main indicators of the quality of SV is their reliability and LT in orbit, and a significant role in this plays a temperature mode inside of SV, where are the devices. While circulating in the system of temperature control of heat-transfer fluid, for example, nitrogen, transmits heat from the cold surface of the satellite that radiate excess heat into space. At downturn of temperature of a working body under the specified fan is switched off, resulting who in the absence of convection – to a significant increase in thermal resistance between the radiation surface and internal displacement of the surface of the body, and, ultimately, prevented further decrease of the temperature. As a result of improving the control systems, along with the improvement of other life support systems in the LT satellites to date, is more than 10 years, and by 2016 planned LT up to 15 years.

Keywords: space vehicles, lifetime in orbit, temperature mode.

Основными показателями качества космических аппаратов (КА) является их надежность и срок активного существования (САС) на орбите [1]. С целью обеспечения надежной работы на первом спутнике ПС-1 («Простейший спутник первый»), запущенном 4 октября 1957 года, выполненном в виде сферического контейнера диаметром 580 мм, состоящего из двух сферических полуоболочек, изготовленных из листового сплава АМг6 толщиной 2 мм (см. рисунок) [2], использовалась система терморегулирования, при которой тепловой режим внутри объема спутника обеспечивался вентилятором, включавшимся от термореле при температуре, равной или выше 30 °С. При этом циркулирующий в системе терморегулирования азот осуществлял передачу тепла «холодной» задней полуоболочке спутника, излучавшей избыток тепла в космическое пространство. При понижении температуры азота до 20–23 °С вентилятор выключался, что приводило (в отсутствие конвекции) к значительному увеличению теплового сопротивления между радиационной поверхностью и внутренним объемом поверхности корпуса и, таким образом, предотвращало дальнейшее снижение температуры [3].

Срок активного существования спутника ПС-1 на орбите составил 3 месяца: запуск – 4 октября 1957 года, сход с орбиты – 4 января 1958 года.



Конструктивная схема первого искусственного спутника Земли: *1* – сдвоенное термореле системы терморегулирования; *2* – радиопередатчик; *3* – контрольные термо- и барореле; *4* – антенна, *5* – аккумуляторная батарея; *6* – вентилятор; *7* – диффузор; *8* – дистанционный переключатель; *9* – экран [4]

А 17 апреля 2000 года впервые в нашей стране состоялся запуск телекоммуникационного спутника SESAT-1 (Siberia-Europe Satellite) – первого космического аппарата, изготовленного в ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» («ИСС»), САС которого в течение 10 лет отмечали на предприятии 18 апреля 2010 года.

Спутник SESAT-1 стал базой для разработки и изготовления космических аппаратов серии «Экспресс-АМ», которые сегодня составляют основу орбитальной телекоммуникационной группировки России [5]. Причем согласно Техническим требованиям к космическому аппарату «Экспресс АМУ2» [6], запуск которого запланирован на 2016 год [7], предусмотрен срок его активного существования не менее 15 лет с момента окончательной или условной приемки КА на орбите, что и было спрогнозировано ране [8].

SEASAT-1 был построен на базе модифицированной спутниковой герметичной платформы «КАУР-4» (МСС-727), где полезная нагрузка находится в непроницаемом отсеке и охлаждение производится с помощью активной газожидкостной системы терморегулирования (СТР), обеспечивающей поддержание температуры на выходе теплоносителя из радиатора 27 ± 1 °С [9], что гарантирует колебания температуры аппаратуры в отсеке в пределах не более 10 °С, в результате чего срок службы был увеличен до 10 лет. ОАО «ИСС» отвечала за проектирование, изготовление и испытания платформы спутника, элементов терморегулирования модуля полезной нагрузки, сборку и испытания в целом, а также за создание наземного комплекса управления и обучение заказчика управлению новым для него космическим аппаратом. Компания Alcatel Space (ныне Thales Alenia Space) обеспечивала проектирование, изготовление, испытания и поставку в «ИСС» модуля полезной нагрузки спутника [10]. Зарубежные специалисты вычислили, что в таком температурном режиме их бортовая аппаратура сможет отработать двойной САС. Назначение и классификация СТР и состав агрегатов двухконтурной (газожидкостной) СТР приведен в работе [11]. Активная СТР содержит нагнетатель жидкого теплоносителя (98 % изооктан) – электронасосный агрегат (ЭНА), регулятор прямого действия – терморегулятор (ТР), который в схеме спутника SESAT задублирован клапаном-регулятором (КР), работающим по сигналам бортовой цифровой вычислительной машины. Для совершенствования такого типа СТР предложено в наземных условия моделировать гидравлическую схему, поскольку при работе ТР или КР [12] возможно возникновение резонансных явлений, которые могут привести к повреждению сварных швов и разгерметизации. Этот метод был внедрен на СТР спутника SESAT. При этом были смоделированы резонансы, в результате чего был выбран способ подавления колебаний путем введения в конструкцию ТР трущейся пары, обеспечивающей возвратно-поступательные движения его трехходового клапана, перепускающего теплоноситель или через радиатор-излучатель (РИ), или мимо него на теневой стороне орбиты. В зависимости температуры теплоносителя трехходовой клапан может находиться и в промежуточном состоянии. Таким образом, регулирование теплового режима КА осуществляется путем изменения площади РИ. Второй способ, предлагаемый в усовершенствованных СТР, – это изменение расхода газа Gt в газовом контуре и расхода теплоносителя Gt в жидкостных

контурах. Для реализации вышеуказанного метода предлагается применять нагнетатели газа – вентиляторы (В) и нагнетатели жидкости – ЭНА [13] с рабочими лопатками, изготовленными из материала с «памятью формы», например из никелида титана Ni–Ti, которые изменяют кривизну профиля и угол атаки в зависимости от температуры, что приводит к увеличению или уменьшению расхода рабочего тела. Такие В и ЭНА являются регуляторами температуры прямого действия. Для определения расчётных случаев и получения параметров системы используем уравнение теплового баланса КА в общем виде [13]:

$$\sum m_i c_i dT_i = \left(Q_{\text{нар}} - Q_{\text{вн}}\right)dt - Q_{\text{изл}}dt ,$$

где m_i, c_i, dT_i – масса, удельная теплоёмкость и температура i-го элемента; $Q_{\text{нар}}$, $Q_{\text{вн}}$ и $Q_{\text{изл}}$ – соответственно, наружный, внутренний и излученный РИ тепловые потоки. Величина внутреннего теплового потока оценивается по затратам мощности в узлах КА и зависит от программы работы энергоустановок и бортовой аппаратуры (БА), для регулирования температуры которой и служит СТР. Отвод тепла осуществляется изменением от поверхности РИ КА площадью F_p со степенью черноты ε. Для определения расчетного значения площади РИ принимаем допущение об осреднении его температуры, учитываем интенсивность циркуляции жидкого теплоносителя, толщину обшивки и небольшой шаг между витками трубопроводов [11]. С учетом указанного допущения величина площади излучающей поверхности герметичного отсека F_p определяется при помощи следующих соотношений:

$$F_p = \frac{Q_{\text{вн}} \pm Q_{\text{э}}}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_p^4 - q_{\text{погл}}},$$

$$q_{\text{погл}} = A_s \cdot q_s \cdot \left(\overline{F_m^s} + \alpha_{\text{з}} \cdot \tilde{\varphi}_2^m \cdot \overline{F_m^E}\right) + \varepsilon \cdot q_E \cdot \tilde{\varphi}_1^m \cdot \overline{F_m^E} .$$

Расчет средней температуры РИ выполняют путем последовательных приближений с использованием дополнительных зависимостей вида

$$T_p = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2} - \Delta t_{\text{г}-p},$$

$$\Delta t_{\text{г}-p} = \frac{Q_{\text{вн}} - Q_{\text{э}}}{\alpha \cdot F_p} ,$$

где $\Delta_{\text{г}-p}$ – перепад температуры между средней температурой РИ и температурой жидкостного теплоносителя в канале радиационного теплообменника. Анализ полученного соотношения для F_p показывает, что площадь РИ зависит как от внутреннего тепловыделения $Q_{\text{вн}}$ аппаратуры КА, так и от внешней тепловой нагрузки $q_{\text{погл}}$, действующей на КА. Эти факторы являются определяющими при рассмотрении основных расчетных случаев для ТР КА [14]. Расчетными случаями будем называть наиболее характерные для анализируемого ТР тепловые режимы, которые реализуются в условиях длительного функционирования КА в космическом пространстве [15; 16]. Выбор расчетных случаев для решаемой задачи определяется совокупностью следующих факторов:

1) ориентацией космического аппарата на рабочей орбите (при заданных параметрах орбиты);

2) условиями освещенности КА на орбите функционирования (пребыванием аппарата на освещенном τ_s или теневом τ_t участках орбиты);

3) уровнем энергопотребления аппаратуры ($N_{\max}$ или $N_{\min}$).

Из всех возможных случаев ориентации КА на рабочей орбите выделим два положения, различающиеся, прежде всего, действующей на КА внешней тепловой нагрузкой $q_{\text{погл}}$:

– положение I – продольная ось КА находится в плоскости орбиты и ориентирована по направлению местной вертикали;

– положение II – продольная ось КА находится в плоскости орбиты и плоскости местного горизонта.

Для каждого из указанных положений определим три характерных расчетных случая:

– Iа (IIа) – энергопотребление $N_{\max}$, КА находится на освещенном участке орбиты τ_s;

– Iб (IIб) – энергопотребление $N_{\min}$, КА находится на освещенном участке орбиты функционирования τ_s, значение длительности импульса тепловыделений аппаратуры, размещенной внутри герметичного отсека, удовлетворяет неравенству $\tau_\sigma < \tau_s$;

– Iв (IIв) – энергопотребление $N_{\min}$, когда КА находится на теневом участке рабочей орбиты τ_t.

Работа В и ЭНА происходит в сети КА, которая характеризуется гидросопротивлением в зависимости от расхода рабочей жидкости. С другой стороны, необходимо расчётным путем [13] и при экспериментальных исследованиях В и центробежных ЭНА с лопатками из материала с «памятью формы» [17], например из никелида титана (55 вес. % Ni + 45 вес. % Ti), более известного под названием нитинол, определить расходно-напорные характеристики при различных температурах и, наложив их на характеристики сети КА, определить рабочие точки. Эффектом памяти формы обладают также сплавы систем Cu–Al–Ni и Cu–Al–Zn и др. Применение лопаток в центробежном насосе, изготовленных из никелида титана, обладающего эффектом памяти формы [18], которые изменяют геометрию в результате изменения температуры рабочей среды, описано в патенте РФ № 98500 на полезную модель [19].

Библиографические ссылки

1. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Изв. высших учебных заведений. Приборостроение, 2008. Т. 51, № 8. С. 5–12.

2. Околоземный орбитальный космический аппарат «Спутник-1» («ПС-1»). URL: http://apervushin.

narod.ru/encl/sputnik/ussr/sputnik01/sp1.htm (дата обращения 14.07.2014).

3. Первый искусственный спутник Земли [Электронный ресурс]. URL: http://godkosmicheskojjery.ru/1-isz2_1.html (дата обращения 14.07.2014).

4. Афанасьев И. Б., Лавренов А. Н. Большой космический клуб. М. : Изд. дом «Новости космонавтики» : РТСофт, 2006. 256 с.

5. Пресс-служба ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». 16.04.2010. URL: http://www.federalspace.ru/9832/ (дата обращения 18.07.2014).

6. Отечественные спутники связи. Новости космонавтики [Электронный ресурс]. URL: http://www.rscc.ru/files.images/tt_amu2.pdf (дата обращения 20.07.2014).

7. В «Космической связи» намерены создать спутник «Экспресс-АМУ2» [Электронный ресурс]. URL: http://www.osp.ru/news/2013/1023/13021548/ (дата обращения 22.07.2014).

8. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Методы поэтапного обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов со сроками активного действия 10–15 лет // Космические вехи : сб. науч. тр. Красноярск : ИП Суходольская Ю. П., 2009. С. 445–457.

9. Технология производства космических аппаратов : учебник для вузов / Н. А. Тестоедов [и др.]; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 352 с.

10. Sesat (спутник) [Электронный ресурс]. URL: http://fakty-o.ru/sesat# (дата обращения 24.07.2014).

11. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

12. Головёнкин Е. Н. [и др.]. Агрегаты автономных энергетических систем. Красноярск : КрПИ, 1986. 89 с.

13. Двирный В. В., Краев М. В. Малорасходные автономные нагнетатели. Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 152 с.

14. Королёв С. И. Системы обеспечения теплового режима космического аппарата : учеб. пособие. СПб. : Балтийский гос. техн. ун-т, 2006. 91 с.

15. Козлов Л. В. [и др.]. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов и окружающей его среды. М. : Машиностроение, 1971. 377 с.

16. Атамасов В. Д., Ермолаев В. И., Кукушкин И. О. Система обеспечения теплового режима космического аппарата : учеб. пособие. СПб. : Изд-во МО РФ, 2003. 71 с.

17. Jani J. M. [et al.]. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities // Materials & Design. 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.

18. Qidwai M. A., Lagoudas D. C. On thermomechanics and transformation surfaces of polycrystalline NiTi shape memory alloy material // International Journal of Plasticity. 2000. Vol. 16, Iss. 10–11. P. 1309–1343.

19. Пат. 98500 Российская Федерация U1 МПК F04D 15/00 (2006.01) F04D 29/22 (2006.01). Центробежный насос / Афанасьев В. Е., Губанов М. В., Муратов А. А. Заявка № 2009126122/06 от 07.07.2009. Бюл. 2010. № 29.

References

1. Patraev V. E., Maksimov Ju. V. [Methods of ensuring reliability of on-Board equipment spacecraft long-term functioning]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 8, p. 5–12. (In Russ.)

2. *Okolozemnyj orbital'nyj kosmicheskij apparat "Sputnik-1" ("PS-1")* [Low earth orbital spacecraft "Sputnik-1" (PS-1)]. (In Russ.) Available at: http://apervushin.narod.ru/encl/sputnik/ussr/sputnik01/sp1.htm. (accesed 10.08.2014)

3. *Pervyj iskusstvennyj sputnik Zemli* [The first artificial Earth satellite]. (In Russ.) Available at: http://godkosmicheskojjery.ru/1-isz2_1.html. (accesed 06.08.2014)

4. Afanas'ev I. B., Lavrenov A. N. *Bol'shoj kosmicheskij klub*. [A big space club]. Moscow, Izdatel'skij dom "Novosti kosmonavtiki" Publ., Izdatel'stvo "RTSoft" Publ., 2006, 256 p.

5. *Press-sluzhba OAO "Informacionnye sputnikovye sistemy" imeni akademika M.F. Reshetnjova"* [The press service of the JSC "Information satellite systems" named after academician M.F. Reshetnev] 16.04.2010. (In Russ.) Available at: http://www.federalspace.ru/9832/ (accessed 18.07.2014)

6. *Otechestvennye sputniki svjazi. Novosti kosmonavtiki* [Domestic communications satellites. Cosmonautics news] (In Russ.) Available at: http://www.rscc.ru/files.images/tt_amu2.pdf. (accessed 20.07.2014)

7. *V "Kosmicheskoj svjazi" namereny sozdat' sputnik "Jekspress-AMU2"* [In "Space communications" the satellite "Express-AMU" is going to be created] (In Russ.) Available at: http://www.osp.ru/news/2013/1023/13021548/. (accessed 22.07.2014)

8. Patraev V. E., Maksimov Ju. V. *Metody pojetapnogo obespechenija nadezhnosti bortovoj apparatury kosmicheskih apparatov so srokami aktivnogo dejstvija 10-15 let. Kosmicheskie vehi: sbornik nauchnyh trudov* [Methods phased reliability of on-Board equipment of the spacecraft with the terms active steps 10-15 years. Space milestone: collection of scientific works]. Krasnoyarsk, IP Suhodol'skaja Ju. Publ., 2009, p. 445–457.

9. Testoedov N. A., Mihnev M. M., Miheev A. E. et al. *Tehnologija proizvodstva kosmicheskih apparatov: uchebnik dlja vuzov* [Production technology of spacecraft: the textbook for high schools]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009, 352 p.

10. *Sesat (sputnik)* [Sesat (satellite)] (In Russ.) Available at: http://fakty-o.ru/sesat#. (accessed 24.07.2014)

11. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovanija kosmicheskih apparatov informacionnogo obespechenija: ucheb. Posobie* [Principles of design of spacecraft information support: textbook. manual]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2011, 488 p.

12. Golovjonkin E. N., Dvirnyj D. V., Kovaljov N. A. et al. *Agregaty avtonomnyh jenergeticheskih system* [The

units stand-alone power systems], Krasnoyarsk, KrPI Publ., 1986, 89 p.

13. Dvirnyj V. V., Kraev M. V. *Malorashodnye avtonomnye nagnetateli* [Low-cost autonomous blowers], Krasnoyarsk, izd-vo Krasnojarskogo un-ta Publ., 1985, 152 p.

14. Koroljov S. I. *Sistemy obespechenija teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata: uchebnoe posobie* [System for thermal regime of the spacecraft: the manual], St. Petersburg, Baltijskij gosudarstvennyj tehnicheskij unitversitet Publ., 2006, 91 p.

15. Kozlov L. V., Nusinov M. D., Akishin A. I. i dr. *Modelirovanie teplovyh rezhimov kosmicheskih apparatov i okruzhajushhej ego sredy* [Modelling of thermal modes of the spacecraft and its environment], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971, 377 p.

16. Atamasov V. D., Ermolaev V. I., Kukushkin I. O. *Sistema obespechenija teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata. Uchebnoe posobie* [System for thermal regime of the spacecraft. Tutorial], St. Petersburg, Izd-vo MO RF Publ., 2003, 71 p.

17. Jani J. M. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*. April 2014. Vol. 56. P. 1078–1113.

18. Qidwai M. A., Lagoudas D. C. On thermomechanics and transformation surfaces of polycrystalline NiTi shape memory alloy material. *International Journal of Plasticity*. 2000. Vol. 16, Issues 10–11. P. 1309–1343.

19. Afanas'ev V. E., Gubanov M. V., Muratov A. A. *Centrobezhnyj nasos* [Centrifugal pump]. Patent RF, no. 98500, 2009.

© Крушенко Г. Г., Голованова В. В., 2014

Раздел
Part
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

УДК 539.21:537.86

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 192–197

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $Bi_{1-x}La_xFeO_3$

С. С. Аплеснин, А. А. Остапенко, В. В. Кретинин,
А. М. Панасевич, А. И. Галяс, К. И. Янушкевич

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
220072, Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, 19
E-mail: kretin@mail.ru

Исследуются мультиферроики на основе $BiFeO_3$ с пространственно-модулированной антиферромагнитной структурой. Мультиферроики на основе $BiFeO_3$ широко и интенсивно исследуются как модельные объекты для исследования механизма взаимодействия между электрической и магнитной подсистем, так и для возможного использования их в спиновой электронике. Возможность электрического управления намагниченностью материала при комнатной температуре представляет интерес с точки зрения его использования в элементах компьютерной памяти с электрической записью и магнитным считыванием. Цель работы – определить изменение магнитоэлектрического взаимодействия в результате варьирования антисимметричного обмена при замещении висмута лантаном, исследовать механизм низкотемпературных и высокотемпературных аномалий диэлектрической проницаемости при замещении висмута лантаном, установить магнитоэлектрические свойства неупорядоченной системы со случайным распределением константы магнитоэлектрической связи. На пленках $La_xBi_{1-x}FeO_3$ проведены измерения диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь в области температур 100 K < T < 1000 K без магнитного поля и в магнитном поле B = 0,8 Тл. Определена температурная зависимость реальной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь на частоте 10^5 Гц. При приближении к сегнетоэлектрическому переходу резко возрастает диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. При температуре T_1 = 835 K, возможно, происходят изменения в кристаллической структуре, связанные с переходом в орторомбическую фазу. В окрестности магнитного фазового перехода аномалий в температурном поведении диэлектрической проницаемости не найдено. Замещение висмута лантаном приводит к небольшому увеличению магнитоемкости по сравнению с чистым $BiFeO_3$. Магнитоемкость увеличивается во внешнем электрическом поле смещения, проходит через максимум и падает с ростом температуры.

Ключевые слова: мультиферроики, магнитоемкость, релаксация, диэлектричекая проницаемость.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 192–197

DIELECTRIC PROPERTIES OF $Bi_{1-x}La_xFeO_3$ THIN FILMS

S. S. Aplesnin, A. A. Ostapenko, V. V. Kretinin,
A. M. Panasevich, A. I. Galyas, K. I. Yanushkevic

Scientific-Practical Materials Research Center NAS
19, P. Brovki St., Minsk, Belarus, 220072
E-mail: kretin@mail.ru

Multiferroics on the basis of $BiFeO_3$ with spatially-modulated anti-ferromagnetic structure were investigated. The compounds $BiFeO_3$ widely and intensively are investigated as model objects for research of the mechanism of interaction between electric and magnetic subsystems, and for their possible use in spin electronics. Possibility of electric management of magnetization of a material at a room temperature is of interest from the point of view of its use in elements of computer memory with electric record and magnetic reading. The purpose of the investigation is to define the change in magnetoelectric interaction as a result of a variation of an antisymmetric exchange and to investigate the mechanism of low-temperature and high-temperature anomalies of dielectric permeability at bismuth replacement by lanthanum. It's important to establish magnetoelectric properties of disorder system with random distribution of a constant of magnetoelectric interaction. On films of $La_xBi_{1-x}FeO_3$ measurements of dielectric permeability, a tangent of angle of losses in the range of temperatures 100 K < T < 1000 K without magnetic field and in a magnetic field of B=0.8 T are carried out. The temperature dependences of a real part of dielectric permeability and a tangent of losses angles at a frequency of 10^5 Hz are defined. At approach to ferroelectric *transition dielectric permeability and dielectric losses are sharply increased. At a temperature 835 K the changes in crystal structure*

attributed to transition from rhombohederal to the orthorhombic phase was found. In the vicinity of magnetic phase transition the anomalies in temperature behavior of dielectric permeability are absent. Bismuth replacement by lanthanum leads to small increase in magnetocapacity, in comparison with pure $BiFeO_3$. Magnetocapacity increases in external electric field, passes through a maximum and falls with growth of temperature.

Keywords: multiferroics, magnetocapacitance, relaxation, permittivity.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию материалов с сильной взаимосвязью между электрическими и магнитными свойствами в связи с практическим интересом создания элементарной базы микроэлектроники [1; 2]. Мультиферроики на основе $BiFeO_3$ широко и интенсивно исследуются как модельные объекты для исследования механизма взаимодействия между электрической и магнитной подсистем, так и для возможного использования их в спиновой электронике [3]. Сосуществование магнитной и сегнетоэлектрической подсистем предполагает взаимодействие между ними. В средах с магнитным и электрическим упорядочением, помимо линейного эффекта, можно ожидать нелинейных эффектов более высокого порядка по электрическому и магнитному полю (квадратичных, кубических), а также переключения электрической поляризации магнитным полем [4] и, наоборот, переключения намагниченности электрическим полем [5].

Обширную группу мультиферроиков образуют среды с неоднородным распределением магнитного параметра порядка. Период пространственной модуляции намагниченностей подрешёток в таких веществах может на несколько порядков превосходить размер элементарной ячейки. В таких веществах имеют место МЭ-взаимодействия и другого неоднородного типа [6], описываемые линейными по электрической поляризации инвариантными. Неоднородное МЭ-взаимодействие проявляется в виде пространственно-модулированных спиновых структур, наведённых электрической поляризацией.

Двухионный механизм использует зависимость обменных взаимодействий (изотропного гейзенберговского [7] и антисимметричного Дзялошинского–Мория ($D[S_1 \times S_2]$) [8]) от координат магнитных ионов и промежуточных лигандов (например кислорода). Смещение иона лиганда приводит к изменению величины вектора Дзялошинского, что влечёт за собой скос антиферромагнитных подрешёток. Возможен и обратный эффект: возникновение поляризации под действием магнитного поля. Антисимметричный обмен Дзялошинского–Мория ответственен также за наблюдаемую в спиральных мультиферроиках взаимосвязь спиновых циклоид и электрической поляризации.

Электрическая поляризация может возникнуть в результате образования доменных границ, которые могут рассматриваться как фрагменты магнитных спиралей, и к ним может быть применена та же идеология спинового флексоэлектричества, что и для «спиральных» мультиферроиков. Прямым следствием этого является электрическая поляризация доменных границ и возможность управления ими с помощью электрического поля [9]. Сегнетоэлектрические доменные границы и магнитные доменные границы в мультиферроиках оказываются взаимосвязанными [10]. Одним из возможных механизмов такой связи в мультиферроиках является флексомагнитоэлектрический эффект. Скачок электрической поляризации на границах сегнетоэлектрических доменов должен приводить к скачку пространственной производной от магнитного параметра порядка [11], что проявляется в виде неоднородностей в магнитной структуре на границах. Если в материале сосуществуют магнитная (антиферромагнитная) и сегнетоэлектрическая доменные структуры, то указанный эффект может проявляться в виде пиннинга (закрепления) магнитных доменных границ на сегнетоэлектрических доменных границах [12].

Образование потенциального барьера вблизи границы приводит к повышению концентрации носителей заряда, к уменьшению ширины запрещённой зоны в полупроводнике на 3 % (около 0,1 эВ) и к высокой проводимости доменной границы, которую можно «переключать» с помощью электрического поля (изменять её величину более чем на порядок), что позволяет создавать мемристорные устройства.

Спиновая циклоида с периодом около 62 нм [13], лежащая в плоскости, перпендикулярной базисной, и бегущая вдоль одной из трёх осей симметрии второго порядка, обнаружена в феррите висмута $BiFeO_3$. Причиной возникновения спиновой циклоиды является флексомагнитоэлектрическое взаимодействие. Структура и период циклоиды зависят от температуры, магнитной анизотропии и концентрации примесей [14] и подавляется в больших магнитных полях [15].

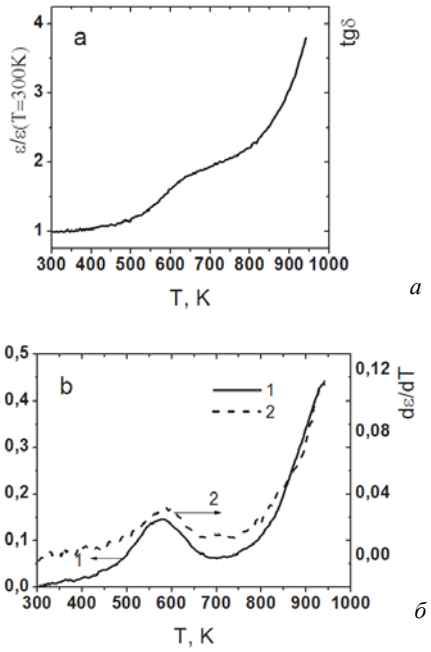
Другой тактикой, позволяющей достичь того же эффекта, является замещение атомов висмута редкоземельными ионами. В этом случае отпадает необходимость в слое ферромагнетика, поскольку замещённый состав феррита висмута обладает собственной намагниченностью. Те же управляющие напряжения (10 В) перестраивали магнитную доменную структуру из лабиринтной в полосовую [16]. Возможность электрического управления намагниченностью материала при комнатной температуре представляет интерес с точки зрения его использования в элементах компьютерной памяти с электрической записью и магнитным считыванием.

Относительно небольшие механические напряжения (7 МПа) [1] снимают вырождение в базисной плоскости по направлениям пространственной модуляции, что приводит к повороту плоскости спиновой циклоиды, поэтому вполне естественно ожидать, что большие давления могут привести к разрушению спиновой циклоиды. Своеобразным аналогом механического давления может служить частичное замещение ионов кристалла $BiFe0_3$ примесями, которые варьируют величину магнитоэлектрической связи [17]. Составы на основе феррита висмута можно разбить на две основные группы: с замещением ионов висмута

и с замещением ионов железа. В первом случае используются, как правило, редкоземельные примеси, и по мере увеличения их процентного состава свойства феррита висмута становятся ближе к свойствам, характерным для ортоферритов [18].

Цель работы – определить изменение магнитоэлектрического взаимодействия в результате варьирования антисимметричного обмена при замещении висмута лантаном. Для объемного феррита висмута установлены аномалии физических характеристик при температурах T_1 = 140 К и T_2 = 550 К, которые связываются с поверхностным фазовым переходом. В этом случае этот переход проявится в тонких пленках и обнаружится в аномалиях диэлектрической проницаемости.

Экспериментальные результаты и обсуждение. На пленках $La_xBi_{1-x}FeO_3$ (x = 0,1) толщиной 160 нм проведены измерения диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь в области температур 100 К < T < 1000 К без магнитного поля и в магнитном поле H = 0,8 Тл. На рис. 1 изображены температурное поведение диэлектрической проницаемости, нормированной на величину проницаемости при T = 300 К, и тангенса угла потерь для $La_xBi_{1-x}FeO_3$ для состава с x = 0,1. Производная $d\varepsilon/dT$ (рис. 1, *б*) обнаруживает максимум при температуре T_1 = 583 К и излом при T_1 = 835 К.



а

б

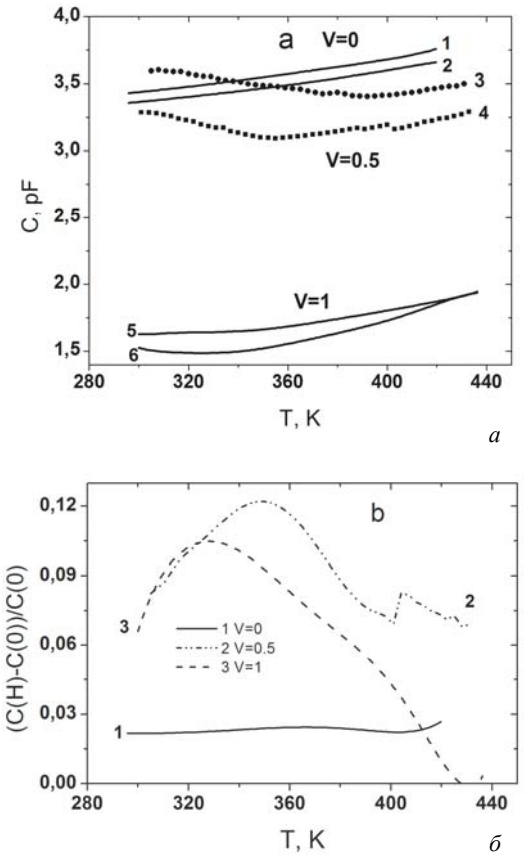
Рис. 1. Диэлектрическая проницаемость, нормированная на величину проницаемости при T = 300 К (*а*), тангенс угла потерь (1), производная диэлектрической проницаемости по температуре (2) (*б*) для $La_xBi_{1-x}FeO_3$ для состава с x = 0,1 на частоте 10^5 Гц от температуры

Замещение ионов висмута лантаном приводит к росту температуры Нееля, например от T_N = 646 К (x = 0) до T_N = 660 К (x = 0,05) [19]. В объемных образцах $BiFeO_3$ коэффициент теплового расширения имеет пик при T = 533 К и перегиб в температурной зависимости теплоемкости при T = 540 К [19], который связывается со структурным переходом. В результате замещения висмута лантаном в объемных образцах меняется величина обменного взаимодействия с дисперсией распределения локальных обменных полей, что приводит к размытию магнитного фазового перехода и к отсутствию взаимосвязи диэлектрических и магнитных характеристик. Это может быть также связано и с тем, что при структурном переходе меняется тип магнитного порядка от несоразмерной структуры к коллинеарной, что приводит к исчезновению магнитоэлектрического взаимодействия. Рост диэлектрических потерь вызван увеличением радиуса взаимодействия между дипольными моментами через спиновые волны и усилением рассеяния полярных оптических мод. Температурная зависимость тангенса угла потерь приведена на рис. 1, *б*. При приближении к сегнетоэлектрическому переходу резко возрастает диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. При температуре T_1 = 835 К, возможно, происходят изменения в кристаллической структуре, связанные с переходом в орторомбическую фазу.

В области низких температур также найден максимум в диэлектрической проницаемости при T = 145 К и минимум при T = 220 К. Диэлектрические потери в образце $La_xBi_{1-x}FeO_3$ также максимальны при T = 145 К, и существует перегиб в температурной зависимости tgδ(T) при T = 220 К. Низкотемпературная аномалия в диэлектрических, структурных характеристиках наблюдалась в нанотрубках феррита висмута $BiFeO_3$ [20] и отсутствует в объемных образцах. Так, меняется наклон частоты Рамановских фононных мод от температуры при T = 140 К. Частота фононной моды E типа увеличивается на 14 $см^{-1}$. Растет диссипация ультразвука, скачок импеданса (который связывается с ростом емкости) при T = 150 К, изменение объема элементарной ячейки. Все эти изменения характеристик приписываются поверхостным структурным и магнитным фазовым переходам [21; 22]. Пироэлектрический ток имеет резкий максимум при T = 150 К, температура которого смещается в сторону низких температур при охлаждении образца в магнитном поле. Ток индуцирован электронами, расположенными в ловушках. Изменение концентрации электронов фиксируется по асимметрии формы линии ЭПР сигнала. Таким образом, механизм наблюдаемой диэлектрической аномалии в образце $La_xBi_{1-x}FeO_3$ обусловлен делокализацией электронов проводимости в доменных стенках сегнетоэлектрического и магнитного типов. В области температур 150–200 К электроны локализуются в потенциальных ямах в доменной границе, где существует повышенная концентрация электронов. В доменной границе сегнетоэлектрического типа электрическое поле равно нулю и электроны свободно двигаются внутри границы. С понижением температуры подвижность электронов падает, и при T = 145 К потенциальная энергия превалирует над кинетической энергией, что приводит к локализации электронов и дополнительной поляризации.

На рис. 2 приведены температурные зависимости электроемкости $C(T)$ без поля и в магнитном и электрическом полях. В отсутствие электрического поля смещения емкость (диэлектрическая проницаемость)

монотонно растет при нагревании, причем в магнитном поле емкость увеличивается на 2,5 %. Замещение висмута лантаном привело к росту магнитоемкости по сравнению с $BiFeO_3$ [19]. Электрическое поле смещения прикладывалось перпендикулярно плоскости пленки для двух значений напряжений U = 0,5 В, U = 1 В. В поле смещения U = 0,5 В емкость незначительно уменьшается от температуры, проходит через минимум и растет. Температура минимума смещается в сторону высоких температур. Магнитоемкость $(\varepsilon(H) - \varepsilon(0)) / \varepsilon(0)$ имеет максимум, величина которого в пять раз превышает значение магнитоемкости без внешнего электрического поля (рис. 2, *б*). С ростом электрического поля смещения магнитоемкость уменьшается и исчезает при T = 430 К в поле смещения U = 1 В.

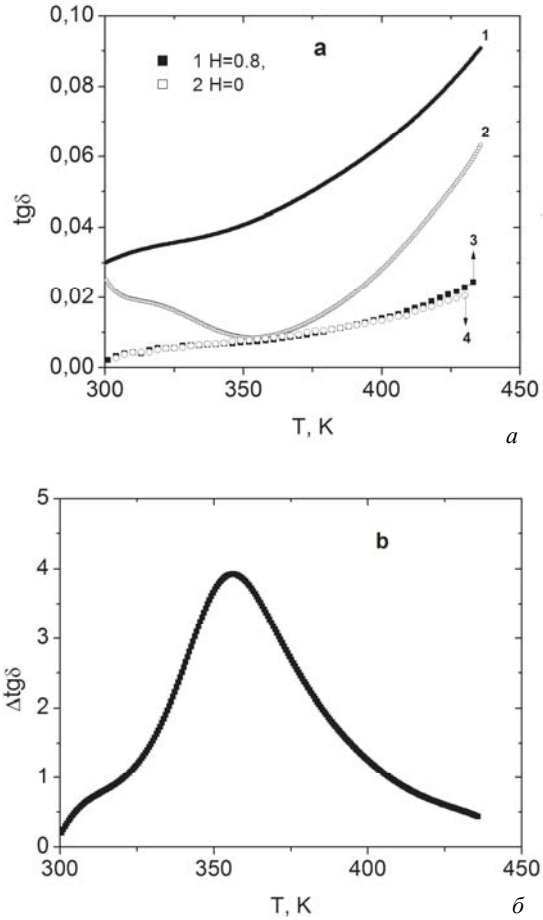


а

б

Рис. 2. Емкость $La_xBi_{1-x}FeO_3$ на частоте 10^5 Гц от температуры в магнитном поле H = 0,8 Тл (1), 0 Тл (2) с U = 0, в электрическом поле с напряжением U = 0,5 В в поле H = 0,8 Тл (3), 0 Тл (4), с U = 1 В, H = 0,8 Тл (5), 0 Тл (6) (*а*); относительное изменение емкости в магнитном поле H = 0,8 Тл с напряжением смещения U = 0 В (1), 0,5 В (2), 1 В (3) (*б*)

Эти эффекты можно объяснить в модели доменных структур магнитного и сегнетоэлектрического типов. Внешнее электрическое поле перестраивает магнитную структуру из лабиринтной в полосовую с уменьшением плотности доменов и образованием результирующей поляризации. Энергия взаимодействия вектора поляризации с электрическим полем компенсируется деполяризующим полем. В результате границы доменных стенок фиксируются и при нагревании, достигнув некоторой температуры, начинают двигаться, схлопываться и исчезать. Внешнее магнитное поле приводит к росту вектора электрического смещения за счет магнитоэлектрической связи и, соответственно, к увеличению диэлектрической проницаемости. В больших электрических полях уменьшается плотность доменных стенок и пьезоэлектрическое взаимодействие между ними. Уменьшение упругих деформаций в пленке вызывает понижение магнитоупругого взаимодействия и константы антисимметричного взаимодействия, что может привести к исчезновению магнитоэлектрической связи и эффекта магнитоемкости.



а

б

Рис. 3. Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^5 Гц от температуры в магнитном поле H = 0 (3), 0,8 (4) Тл, U = 0,5 В; H = 0 (2), 0,8 (1) Тл, U = 1 В (*а*); изменение диэлектрических потерь в магнитном поле $\Delta tg = (tg\ \delta(H) - tg\ \delta(0))/tg\ \delta(0)$ с U = 1 В (*б*)

Диэлектрические потери в пленке с напряжением смещения U = 0,5 В практически не зависят от внешнего магнитного поля и плавно растут при нагревании (рис. 3, *а*). В то время как в поле смещения U = 1 В диэлектрические потери минимальны при T = 360 К и сильно возрастают во внешнем магнитном поле (рис. 3). Относительное изменение потерь в магнитном

поле от температуры имеет максимум и исчезает в области высоких температур (рис. 3, *б*). Это также объясняется в рамках модели взаимодействия магнитной и электрической подсистем через упругую решетку. Корреляция колебаний доменных стенок осуществляется через доменную область. Чем больше область домена, тем сильнее рассеяние полярных оптических мод на акустических колебаниях решетки и дефектах. В магнитном поле размер домена увеличивается и возрастают диэлектрические потери. Плотность акустических колебаний имеет максимум в окрестности температуры Дебая, которая для $BiFeO_3$ имеет величину 340 К [23]. Температура максимума диэлектрических потерь находится вблизи температуры Дебая.

Заключение. В твердом растворе $La_xBi_{1-x}FeO_3$ обнаружены максимумы в диэлектрической проницаемости и в диэлектрических потерях в области низких и высоких температур, которые вызваны локализацией электронов в доменных стенках и структурным переходом в высокотемпературной области. В окрестности магнитного фазового перехода аномалий в температурном поведении диэлектрической проницаемости не найдено. Замещение висмута лантаном приводит к небольшому увеличению магнитоемкости по сравнению с чистым $BiFeO_3$. Магнитоемкость увеличивается во внешнем электрическом поле смещения, проходит через максимум и падает с ростом температуры. Изменение тангенса диэлектрических потерь в магнитном поле достигает максимальной величины в области температуры Дебая, что указывает на упругий характер взаимодействия между поляризацией и намагниченностью в твердых растворах $La_xBi_{1-x}FeO_3$.

Библиографические ссылки

1. Пятаков А. П., Звездин А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. 2012. Т. 182, № 6(11). С. 583–620.
2. Звездин А. К., Пятаков А. П. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект мультиферроика // УФН. 2004. Т. 174, № 4. С. 465–470.
3. Eerenstein W., Mathur1 N. D., Scott J. F. Multiferroic and magnetoelectric materials // Nature. 2006 Vol. 442. P. 759–765.
4. Попов Ю. Ф. [и др.]. Особенности магнитных, магнитоэлектрических и магнитоупругих свойств мультиферроика ферробората самария $SmFe_3(BO_3)_4$ // ЖЭТФ. 2010. Т. 138, № 2. С. 226.
5. Choi Y. J., Zhang C. L., Lee N., Cheong S-W. Cross-Control of Magnetization and Polarization by Electric and Magnetic Fields with Competing Multiferroic and Weak-Ferromagnetic Phases // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 105, № 097201.
6. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect // J. Phys. 2005. Vol. 38. P. 123–152.
7. Date M., Kanamori J., Tachiki M. Origin of Magnetoelectric Effect in Cr_2O_3 // J. Phys. Soc. Jpn. 1961. Vol. 16, № 12. P. 2589.
8. Kimura T. A. Spiral Magnets as Magnetoelectrics // Rev. Mater. Res. 2007. Vol. 37. P. 387–413.
9. Dzyaloshinskii I. Magnetoelectricity in ferromagnets // Europhys. Lett. 2008. Vol. 83, № 6. 67001.
10. Fiebig M. [et al.]. Observation of coupled magnetic and electric domains // Nature. 2002. Vol. 419. P. 818–820.
11. Gareeva Z. V., Zvezdin A. K. Pinning of magnetic domain walls in multiferroics // Europhys. Lett. 2010. Vol. 91, № 4. 47006.
12. Гареева З. В., Звездин А. К. Влияние магнитоэлектрических взаимодействий на доменные границы мультиферроиков // ФТТ. 2010. Т. 52, № 8. С. 1595.
13. Sosnowska I, Peterlin-Neumaier T, Steichele E. Spiral magnetic ordering in bismuth ferrite // J. Phys. C. 1982. Vol. 15, № 23 4835.
14. Залесский А. В., Звездин А. К., Фролов А. А., Буш А. А. Пространственно-модулированная магнитная структура в $BiFeO_3$ по результатам исследования спектров ЯМР на ядрах 57Fe // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 71, № 11. С. 682–686.
15. Tehranchi M. M., Kubrakov N. F., Zvezdin A. K. Spin-flop and incommensurate structures in magnetic ferroelectrics // Ferroelectics. 1997. Vol. 204. P. 181.
16. Palkar V. R., Prashanthi K. Observation of magnetoelectric coupling in $Bi_{0.7}Dy_{0.3}FeO_3$ thin films at room temperature // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93, № 13. 132906.
17. Lane W. M., Bandyopadhyay S. Bennett clocking of nanomagnetic logic using multiferroic single-domain nanomagnets // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. P. 173105-1-4.
18. Kadomtseva A. M. [et al.]. High magnetic field investigations of the magnetoelectric effect in magnetic ferroelectrics $(RBi)FeO_3$ // Ferroelectrics. 1995. Vol. 169, № 1. P. 85–95.
19. Разумовская О. Н. [и др.]. Особенности тепловых, магнитных и диэлектрических свойств мультиферроиков $BiFeO_3$ и $Bi_{0.95}La_{0.05}FeO_3$ // ФТТ. 2009. Т. 51, № 6. С. 1123–1126.
20. Jarrier R. [et al.]. Surface phase transitions in $BiFeO_3$ below room temperature // Phys. Rev. B. 2012. Vol. 85, No. 184104.
21. Singh M. K., Katiyar R. S., and Scott J. F. Critical phenomena at the 140 and 200 K magnetic phase transitions in $BiFeO_3$ // J. Phys: Condens. Matter. 2008. Vol. 20, № 32. 252203.
22. Singh M. K. [et al.]. Spin-glass transition in single-crystal $BiFeO_3$ // Phys. Rev. 2008. Vol. 77, № 14. 144403.
23. Blaauw C. and van der Woude F. Magnetic and structural properties of BiFe03 // J. Phys. C: Solid State Phys. 1973. Vol. 6. P. 1422–1431.

References

1. Pjatakov A. P., Zvezdin A. K. [Magnetoelectric materials and multiferroics]. *Uspehi fizicheskih nauk*. 2012, vol. 182, no. 6, p. 583–620. (In Russ.)
2. Zvezdin A. K., Pjatakov A. P. [Phase transitions and the giant magnetoelectric effect in multiferroic].

Uspehi fizicheskih nauk. 2004, vol. 174, no. 4, p. 465–470. (In Russ.)

3. Eerenstein W., Mathur1 N. D., Scott J. F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature*. 2006, vol. 442, p. 759–765.

4. Popov Yu. F., Pyatakov A. P., Kadomtseva A. M., Vorob'ev G. P., Zvezdin A. K., Mukhin A. A., Ivanov V. Yu. [Features of the magnetic, magnetoelectric and magnetoelastic properties of multiferroic ferroborate samarium $SmFe_3(BO_3)_4$]. *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*. 2010, vol. 138, no. 2, p. 226. (In Russ.)

5. Choi Y. J., Zhang C. L., Lee N., Cheong S-W. Cross-Control of Magnetization and Polarization by Electric and Magnetic Fields with Competing Multiferroic and Weak-Ferromagnetic Phases *Phys. Rev. Lett.* 2010, vol. 105, issue. 097201. doi: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.097201.

6. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect. *J. Phys.* 2005, vol. 38, p. 123–152.

7. Date M., Kanamori J., Tachiki M. Origin of Magnetoelectric Effect in Cr_2O_3. *J. Phys. Soc. Jpn*. 1961, vol. 16, no. 12, p. 2589.

8. Kimura T. A. Spiral Magnets as Magnetoelectrics. *Rev. Mater. Res.* 2007, vol. 37, p. 387–413.

9. Dzyaloshinskii I. Magnetoelectricity in ferromagnets. *Europhys. Lett.* 2008, vol. 83, no. 6, issue 67001.

10. Fiebig M. et al. Observation of coupled magnetic and electric domains. *Nature.* 2002, vol. 419, p. 818–820.

11. Gareeva Z. V., Zvezdin A. K. Pinning of magnetic domain walls in multiferroics. *Europhys. Lett.* 2010, vol. 91, no. 4, issue 47006.

12. Gareeva Z. V., Zvezdin A. K. [Effect of magnetoelectric interactions at domain boundaries multiferroic]. *Fizika Tverdogo Tela.* 2010, vol. 52, no. 8, p. 1595. (In Russ.)

13. Sosnowska I, Peterlin-Neumaier T, Steichele E. Spiral magnetic ordering in bismuth ferrite *J. Phys. C.* 1982, vol. 15, no. 23, issue 4835.

14. Zalesskij A. V., Zvezdin A. K., Frolov A. A., Bush A. A. [Spatially modulated magnetic structure in $BiFeO_3$ on the results of investigation of the spectra of nuclear magnetic resonance in 57Fe nuclei]. *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*. 2000, vol. 71, no. 11, p. 682–686. (In Russ.)

15. Tehranchi M. M., Kubrakov N. F., Zvezdin A. K. Spin-flop and incommensurate structures in magnetic ferroelectrics. *Ferroelectics*. 1997, vol. 204, p. 181.

16. Palkar V. R., Prashanthi K. Observation of magnetoelectric coupling in $Bi_{0.7}Dy_{0.3}FeO_3$ thin films at room temperature. *Appl. Phys. Lett.* 2008, vol. 93, no. 13, issue 132906.

17. Lane W. M., Bandyopadhyay S. Bennett clocking of nanomagnetic logic using multiferroic single-domain nanomagnets. *Appl. Phys. Lett.* 2010, vol. 97, issue 173105, p. 1–4,

18. Kadomtseva A. M. et al. High magnetic field investigations of the magnetoelectric effect in magnetic ferroelectrics $(RBi)FeO_3$. *Ferroelectrics.* 1995, vol. 169, no. 1, p. 85–95

19. Razumovskaya O. N., Reznichenko L. A., Shilkina L. A., Amirov A. A., Batdalov A. B., Kallaev S. N., Omarov Z. M., Verbenko I. A. [Features thermal, magnetic and dielectric properties of multiferroic $BiFeO_3$ and $Bi_{0.95}La_{0.05}FeO_3$]. *Fizika Tverdogo Tela.* 2009, vol. 51, no. 6, p. 1123–1126. (In Russ.)

20. Jarrier R. et al. Surface phase transitions in $BiFeO_3$ below room temperature. *Phys. Rev. B.* 2012, vol. 85, issue 184104.

21. Singh M. K., Katiyar R. S., and Scott J. F. Critical phenomena at the 140 and 200 K magnetic phase transitions in $BiFeO_3$. *J. Phys: Condens. Matter.* 2008, vol. 20, no. 32, issue 252203.

22. Singh M. K., Prellier W., Singh M. P., Katiyar R. S. and Scott J. F. Spin-glass transition in single-crystal $BiFeO_3$. *Phys. Rev.* 2008, vol. 77, no. 14, issue 144403.

23. Blaauw C. and van der Woude F. Magnetic and structural properties of $BiFe0_3$. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1973, vol. 6, p. 1422–1431.

© Аплеснин С. С., Остапенко А. А., Кретинин В. В., Панасевич А. М., Галяс А. И., Янушкевич К. И., 2014

УДК 621.892

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 198–201

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ НА ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТНЫЕ ПРОЦЕССЫ

С. Г. Докшанин

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26
E-mail: Sergey_dokshanin@mail.ru

Рассматривается возможность повышения фреттингостойкости пластичных смазочных материалов, а также улучшение их противоизносных свойств за счет введения твердых добавок. Тема работы заключается в оценке эффективности применения смазочных материалов с ультрадисперсным алмазографитом для снижения фреттинг-усталостных процессов. Приводятся результаты исследования пластичных смазочных материалов на фреттингостойкость, распределение величины износа образцов от наработки. Выполнен анализ состояния дорожек трения и изменение микрорельефа после применения смазочного материала с твердой добавкой. Полученные результаты показали снижение величины износа в случае применения смазочных материалов с ультрадисперсным порошком алмазографита. Результаты исследований могут быть применены для выбора смазочных материалов, которые используются для узлов трения, работающих в режиме колебаний.

Ключевые слова: фреттинг-усталостные повреждения, касательные напряжения, площадка контакта, фреттингостойкость, смазочный материал, ультрадисперсная добавка.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 198–201

EFFECT OF LUBRICATING COMPOSITION WITH ULTRA–DISPERSIVE ADDITIVES ON FRETTING FATIGUE PROCESS

S. G. Dokshanin

Siberian Federal University,
26, Kirenskiy St., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: Sergey_dokshanin@mail.ru

In this paper the possibility of improving the fretting wear resistance and anti-wear properties of fat in connection with the introduction of solid additives is considered. The topic work is to evaluate the effectiveness of lubricants with ultra–dispersive additives to reduce fretting-fatigue processes. The mechanism of fretting-fatigue consists of processes such as fretting corrosion and mechanical fatigue. Their interaction leads to the damage of the contact surfaces and leads to a drastic reduction in the fatigue endurance limit of parts. Fretting fatigue damage can occur in the bolt, pin, key and spline connections, surfaces of the parts, which were planted with interference, on surfaces of the shafts, clutches and other parts of friction unit. The results of investigation of grease on fretting-wear resistance, the distribution of the amount of wear from time are presented. The analysis of the state of the friction tracks and changeover of surface roughness after applying lubricant with solid additive is given. The experimental results suggest that the introduction of ultradisperse powder mixture of diamond and graphite in grease reduces the formation of fatigue cracks and improves the quality of the surface parts of friction units. This increases the actual contact area and reduces contact pressure. The values of tangential and normal stresses up to 18–20 % and the action of maximum shearing stress will move deeper into the material under the area of contact are also reduced. The application of lubricants with similar additives can increase the service life period of the mechanism twice as much. Test results can be used to select the lubricant used for the friction units operating in the mode of oscillation.

Keywords: fretting fatigue damages, tangential stress, contact area, fretting-wear resistance, lubricant, ultra-dispersive additive.

Введение. Одной из проблем технологического оборудования являются процессы фреттинга, которые часто развиваются в зонах контакта сопряженных деталей при малых колебательных смещениях одной поверхности относительно другой.

Процесс фреттинга является одним из видов контактного взаимодействия твердых тел при наличии нормальной и касательных составляющих сил от внешней нагрузки и сил трения. В зоне контакта на элементарный объем материала будут действовать циклически изменяющиеся напряжения от нормального

сжатия и знакопеременных касательных напряжений от сил трения, возникающих на поверхности у границы контакта. Вследствие малой амплитуды относительного проскальзывания соприкасающихся поверхностей износ при фреттинге является сильно локализованным на площадках фактического контакта, а продукты разрушения поверхностных слоев не имеют возможности свободно выходить из двумерного пространства между трущимися телами. Поэтому они перетираются и накапливаются в окрестностях площадок фактического контакта, что приводит к усилению их абразивного действия [1; 2].

В сочетании таких условий, как проскальзывание при трении и повышение нагрузки, приводящей к росту объемных напряжений, это может привести к развитию наиболее тяжелого последствия − началу процессов фреттинг-усталости [3; 4].

Механизм фреттинг-усталостных процессов включает в себя взаимосвязанное развитие таких процессов, приводящих к повреждению контактирующих поверхностей, как фреттинг-коррозия и механическая усталость. Их взаимодействие ведет к резкому снижению предела выносливости деталей в 1,5–3 раза. Фреттинг-усталостные повреждения характерны для болтовых, штифтовых, шпоночных, шлицевых соединений, поверхностей деталей, посаженных с натягом, валов, муфт и других деталей [5–7].

Механизм зарождения усталостных повреждений прямо связан с силой трения, так как с ее ростом повышается касательное напряжение на контакте. Одним из методов защиты от фреттинг-повреждений являются снижение коэффициента трения и предотвращение проскальзывания контактирующих поверхностей [8]. В этом случае для повышения фреттингостойкости применяемых смазочных материалов могут быть использованы функциональные твердые добавки, например ультрадисперсные порошки алмазографита (УДПАГ).

Цель. Целью проводимых исследований была оценка эффективности введения добавки УДПАГ в пластичные смазочные материалы для повышения их фреттингостойкости. В данной работе приведены отдельные результаты комплексного исследования, проводимого для определения трибологических свойств пластичных смазочных материалов с добавками УДПАГ.

Методы исследований. Испытания проводились по стандартной схеме «плоскость − торец ролика», применяемой для моделирования фреттинг-процессов. Удельное давление на контакте составляло 120−130 МПа, частота колебаний подвижного образца вокруг своей оси 8,2 Гц, амплитуда колебаний 0,4 мм. Время одного цикла испытания составляло 6 ч. Подвижный образец изготавливался из стали 45 с последующей термообработкой до HRC 42−45, неподвижный (пластина) − из стали 30ХГС и термообработкой HRC 38−40. Контактирующие поверхности образцов подготавливались шлифованием до шероховатости R_a = 1,6 мкм.

Для создания смазочных композиций с ультрадисперсным алмазографитом применялись пластичные смазочные материалы марок ЦИАТИМ-201 и солидол (С). Выбор этих марок для исследований основывался на различии их трибологических свойств. Литиевая пластичная смазка ЦИАТИМ-201 обладает хорошей морозостойкостью и может работать в широком интервале температур, имеет удовлетворительную механическую стабильность. Кальциевая пластичная смазка солидол (С) при хорошей коллоидной стабильности, водостойкости и защитных свойствах обладает несколько узким диапазоном рабочих температур и низкой механической стабильностью. Эффективность использования добавки в смазочных материалах оценивалась по величине износа неподвижного образца и состоянию контактирующих поверхностей.

Добавка представляет собой углеродную смесь с размером частиц до 40 нм, в которой доля графита составляет около 80 %, другая часть находится в виде высокодисперсной алмазоподобной фазы. Концентрация добавки в смазочной композиции составила 1 масс. % как наиболее оптимальная при ее использовании в пластичных смазочных материалах [9].

Результаты исследований. Изображенные на рис. 1 графики показывают изменение величины массового износа пластины при использовании базовых смазочных материалов и смазочных композиций на их основе. По данным графикам можно наблюдать, что по величине износа базовые смазочные материалы имеют примерно одинаковые противоизносные свойства, чуть лучшие для солидола (С).

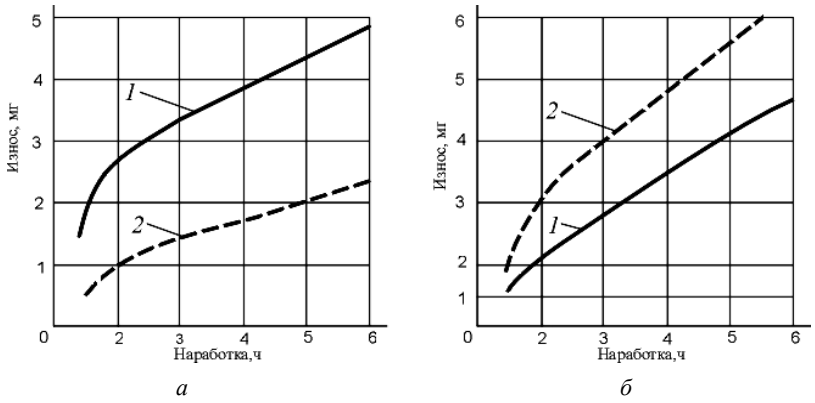


Рис. 1. Зависимость величины износа неподвижного образца от наработки при испытании смазочных материалов: *а* – ЦИАТИМ-201; *б* – солидол (С); *1* – без УДПАГ; *2* – с УДПАГ

Использование твердой добавки заметно изменяет картину. В этом случае различимо возрастает эффективность смазочных свойств у смазочного материала ЦИАТИМ-201, повышая противофреттинговые свойства в 1,8−2,2 раза, тогда как у солидола (С) значительно ухудшаются. Введение УДПАГ в солидол (С) снижает противофреттинговые свойства в 1,2−1,5 раза.

Оценка влияния смазочных материалов на снижение процессов фреттинга выполнялась также по состоянию дорожек трения на неподвижной пластине. Определялась глубина повреждений, изменение величины шероховатости R_a/R_{a0} до и после испытаний, а также общее состояние поверхности.

Исследования обнаружили, что по этим показателям после введения ультрадисперсного алмазографита лучшим является смазочный материал ЦИАТИМ-201, приводящий к качественному изменению микрорельефа трущейся поверхности. Так, на рис. 2 представлены фотографии состояния дорожек трения, полученные после проведения испытаний со смазочным материалом без добавки и после её введения.

Анализ снимков, полученных после проведения испытаний, позволяет судить о том, что ультрадисперсные порошки алмазографита оказывают значительное влияние на микрорельеф поверхностей трения. Можно отметить заметное сглаживание неровностей, снижение количества раковин, царапин, следов коррозионного износа. Такое изменение шероховатости увеличивает фактическую площадь контакта, что снижает контактные давления и более равномерно распределяет нагрузки по контурным площадям контакта.

Рассмотрение других результатов, полученных в ходе проведения исследований, также позволяет сделать выводы об эффективности введения твердой добавки УДПАГ в пластичную смазку ЦИАТИМ-201. После испытаний средняя величина отношения R_a/R_{a0} для смазочного материала без добавки составила R_a/R_{a0} = 2,7, при введении УДПАГ она снизилась и равнялась R_a/R_{a0} = 1,61. Для солидола (С) это отношение изменилось незначительно: 1,14 и 1,06 без добавки УДПАГ и с добавкой соответственно.

Результаты проведенных исследований позволили предположить причины проявления хороших триботехнических характеристик смазочных материалов с добавкой ультрадисперсного порошка алмазографита. В отличие от широко применяемых порошковых добавок, для УДПАГ характерна высокая адгезионная способность к металлическим поверхностям за счет повышенной поверхностной энергии. Наличие собственного заряда и взаимодействие с поверхностью металла приводит к образованию ориентированного слоя на контактирующих поверхностях, что способствует прочному удержанию граничного слоя смазочного материала на поверхности трения. Введенные в смазочный материал частицы ультрадисперсного алмазографита локализуют участки на трущихся поверхностях, образовывая на них прочную пленку. Это снижает коэффициент трения, препятствует схватыванию контактирующих поверхностей и повышает способность пленок смазочного материала выдержать значительные нагрузки без разрушения.

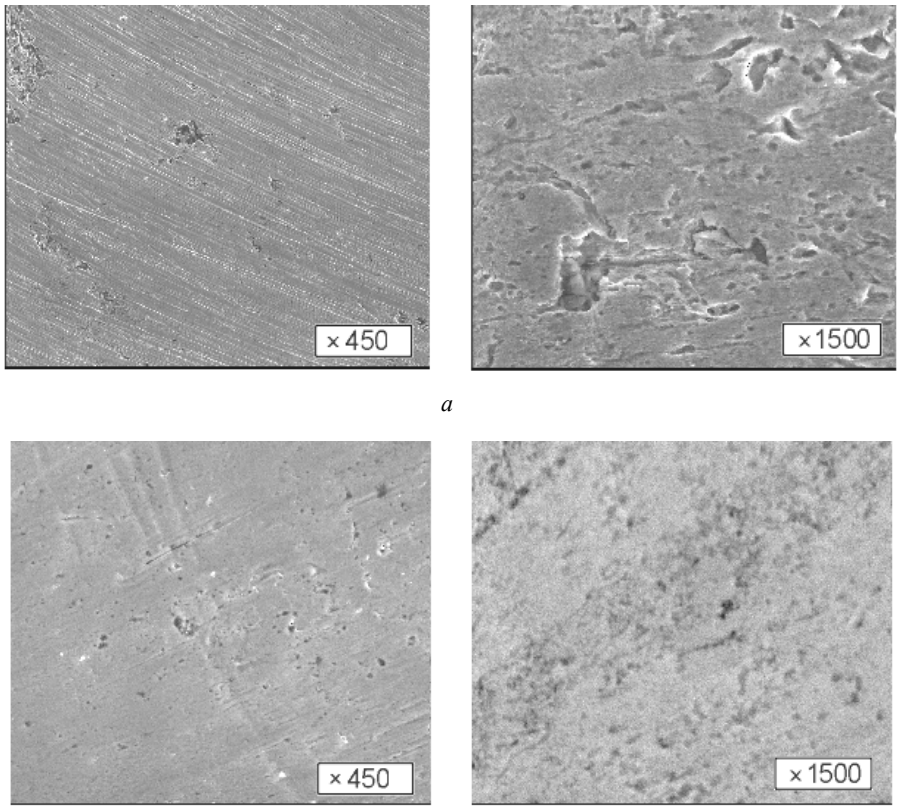


Рис. 2. Внешний вид дорожек трения на пластине после испытаний со смазочным материалом ЦИАТИМ-201: *а* – без добавки УДПАГ; *б* – с добавкой УДПАГ

Таким образом, результаты эксперимента наглядно демонстрируют положительное влияние ультрадисперсного порошка алмазографита на повышение фреттингостойкости литиевых смазочных материалов (ЦИАТИМ-201) и улучшение их противоизносных свойств. С другой стороны, введение добавки в кальциевые смазочные материалы (солидол (С) приводит к ухудшению некоторых смазочных характеристик. Проведенные ранее трибологические исследования для пластичных смазочных материалов также подтверждают положительное влияние УДПАГ на литиевые смазочные материалы [10–12].

Заключение. Введение ультрадисперсного алмазографита снижает величину износа в 1,8−2,2 раза и уменьшает глубину повреждений трущейся поверхности на 24−28 %. Сравнительный анализ значений контактных напряжений, определенных с помощью компьютерного моделирования, показал, что при включении в пластичный смазочный материал добавки УДПАГ происходит снижение величины контактных напряжений на 18–20 %. Это увеличивает время до начала фреттинг-усталостного разрушения поверхности и позволят продлить срок службы узлов трения в 1,5–2 раза по сравнению с базовыми смазочными материалами.

Библиографические ссылки

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность). М. : Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
2. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях. М. : Машиностроение, 1986. 224 с.
3. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 2005. Ч. 1. 494 с.
4. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. М. : Машиностроение, 1999. 544 с.
5. Сосновский Л. А., Махутов, Н. А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин. М. ; Гомель : НПО «Трибофатика», 2000. 304 с.
6. Заверюха Г. Г. Исследование влияния контактных напряжений на долговечность соединяемых элементов // Вестник машиностроения. 2010. № 1. С. 3–9.
7. Петухов А. Н. Вопросы многоцикловой усталости для материалов и деталей современных ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3(19). С. 172–177.
8. Семенов А. Н. Закономерности начальной стадии фреттинг-износа конструкционных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 6. С. 20–25.
9. Терентьев В. Ф., Еркаев Н. В., Докшанин С. Г. Трибонадежность подшипниковых узлов в присутствии модифицированных смазочных композиций. Новосибирск : Наука, 2003. 142 с.
10. Жевнов В. В. [и др.]. О влиянии ультрадисперсных наполнителей на реологические свойства пластичных смазок // Трение и износ. 2001. (22) № 6. С.699–702.
11. Люты М., [и др.]. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами // Трение и износ. 2002. (25) № 4. С.411–424.
12. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н., Петров В. М. Новый пластичный смазочный материал // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 6. С. 34−47.

References

1. Garkunov D. N. *Tribotekhnika (iznos I bezyznosnost)* [Triboengineering (wear and no-wear)]. Moscow, Moscow Agricultural Academy Publ., 2001, 616 p.
2. Drozdov Ju. N., Pavlov V. G., Puchkov V. N. *Trenie i iznos v ekstremalnyh uslovijah* [The friction and wear in extreme conditions]. Moscow, Machinebuilding Publ., 1986, 224 p.
3. Makhutov N. A. *Konstruktsionnaya prochnost, resurs i tekhnogennaya bezopasnost* [Structural strength, lifetime and prevention of technical catastrophes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 494 p.
4. Morozov E. M., Zernin M. V. *Kontaktnye zadachi mekhaniki razrusheniya* [Contact problems of fracture mechanics]. Moscow, Machinebuilding Publ., 1999, 544 p.
5. Sosnovskiy L. A., Makhutov N. A. *Tribofatika: iznosoustalostnye povrezhdeniya v problemakh resursa i bezopasnosti mashin* [Tribofatigue: wear-fatigue damages in a problems of lifetime and safety of machines] Moscow–Gomel “Tribofatigue” Publ., 2000, 304 p.
6. Zaveryukha G. G. [Study of contact stresses influence on the joined elements longevity]. *Vestnik mashinostroeniya.* 2010, no. 1, p. 3–9. (In Russ.)
7. Petukhov A. N. [Questions of high-cycle fatigue for materials and details modern GTE]. *Vestnik SamGAU.* 2009, vol. 19, no. 3, p.172–177. (In Russ.)
8. Semenov A. N. [Regularities of initial stage of structural materials fretting wear]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh*. 2007, no. 6, p. 20–25. (In Russ.)
9. Terent′ev V. F., Erkaev N. V., Dokshanin S. G. *Tribonadezhnost podshipnikovykh uzlov v prisutstvii modificirovannykh smazochnykh kompozicij* [Tribological reliability of bearing units in the presence of the modified lubricant compositions]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003, 142 p.
10. Zhevnov V. V. Smurugov V. A. Delikatnaya [Effect of ultra-dispersive additives on reological characteristics of greases]. *Trenie i iznos.* 2001, vol. 22, no. 6, p. 699–702. (In Russ.)
11. Ljuty M., Kostjukovich G. A., Skaskevich A. A. et al. [The methods for lubricants design with nanoadditives] *Trenie i iznos.* 2002, vol. 25, no. 4, p. 411–424. (In Russ.)
12. Pogodaev L. I., Kuz′min V. N., Petrov V. M. [New grease] *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh*. 2006, no. 6, p. 34–47. (In Russ.)

© Докшанин С. Г., 2014

УДК669.2/.8:629.7

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 202–209

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg, ПРИМЕНЯЕМОГО В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: genry@icm.krasn.ru. Spin-code 2974-6220

Описаны усовершенствованные и разработанные новые технологии, способы и средства, используемые при изготовлении литых деталей и конструкций летательных аппаратов из сплава АМг10ч. В связи с тем, что сплав АМг10ч содержит магний, возник целый ряд проблем при приготовлении и литье сплава по причине склонности этого элемента к окислению, а сплава – к газонасыщению, что приводит к ухудшению качества литых изделий. С целью предотвращения сплава от взаимодействия с атмосферой и влагой формовочной смеси были разработаны и использованы на практике следующие мероприятия: 1) введение в формовочную смесь борной кислоты; 2) дегазация лигатур алюминий–цирконий и алюминий–титан; 3) разработан оптимальный порядок расплавления шихтовых материалов; 4) применена высокотемпературная обработка расплава; 5) фильтрация сплава при заливке в форму с использованием устройства типа «тепловая труба», обеспечивающего быстрое снижение температуры перегретого сплава. Все эти мероприятия, как по отдельности, так и применение некоторых в комплексе, обеспечили получение литых деталей из сплава АМг10ч с требуемыми и повышенными механическими свойствами. Причем отмечается воспроизводимость результатов испытаний механических свойств отливок из разных плавок.

Ключевые слова: сплав АМг10ч, технологии плавки и литья, механические свойства.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 202–209

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF PREPARATION OF THE Al-Mg SYSTEM ALLOY USED IN AIRCRAFT CONSTRUCTIONS

G. G. Krushenko

Institute Computational Modeling SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru. Spin-code 2974-6220

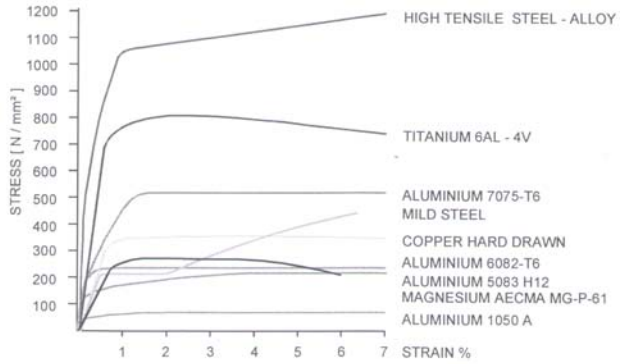
In present article the improved and developed new technologies, methods and means used by manufacturing the moulded pieces and aircraft constructions made of АМг10ч alloy are described. In connection with containing magnesium in АМг10ч alloy, a whole series of problems are arised by preparation and founding the alloy because of inclination this element to oxidation and inclination the alloy to gasing that leads to worsening the quality of cast wares. The following actions were developed and put into practice to avoid the alloy from interaction with atmosphere and moisture of sand: 1) inserting the boric acid into the sand; 2) degassing of aluminum-zirconium and aluminum-titanium ligatures; 3) the optimal order of melting the burden materials was elaborated; 4) the high-temperature treatment of liquid alloy is used and 5) filtration of alloy by the pouring-in casting-form with using the 6) device of thermal pipe type, provided fast temperature reducing of superheated alloy. All these measures, taken separately as well as in complex provide obtaining the moulded pieces of АМг10ч alloy with necessary and improved mechanical properties. At that the reproducibility of the mechanical properties of moulded pieces of different fusions tests results is marked.

Keywords: АМг10ч alloy, technologies fusion and founding, mechanical properties.

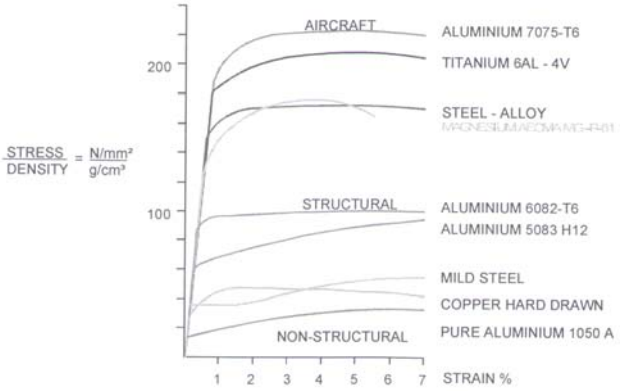
Сплавы системы Al–Mg. При производстве деталей и конструктивных элементов летательных аппаратов (ЛА) широко применяются алюминиевые сплавы [1], и, как следует из прогноза выдающегося ученого-материаловеда, теоретика и создателя высокоэффективных алюминиевых сплавов для авиаракетной и ядерной техники, академика И. Н. Фридляндера, в перспективе ожидается еще большее их использование в этой отрасли [2]. Такой же точки зрения придерживаются и сотрудники Британского аэрокосмического

исследовательского института (Aerospace Research Institute, University of Manchester, UK) [3].

И одна из основных причин популярности этих сплавов в аэрокосмической отрасли – их *высокая удельная прочность*, численно выражающаяся отношением прочности к удельному весу металла (strength-to-weight ratio) [4], $\sigma_в/\rho$), что подтверждается приведенными в работе [5] данными, из которых видно (рис. 1, *а*), что если прочность стали (HIGH TENSILE STEEL) значительно превосходит прочность всех других сплавов, включая и алюминиевые, то алюминиевые сплавы (на примере широко распространенного в производстве летательных аппаратов сплава марки Aluminum 7075 (1,2–2,0 % Cu; 2,1–2,9 % Mg; 0,18–0,28 % Cr; 5,1–6,1 % Zn; примеси не более 0,40 % Si; 0,50 % Fe; 0,30 % Mn; 0,20 % Ti; ост. – Al) имеют наиболее высокую удельную прочность (рис. 1, *б*). Кроме того, эти сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, выдерживают высокие статические, ударные и вибрационные нагрузки, хорошо обрабатываются резанием и свариваемостью.



а



б

Рис. 1. Механические свойства сплавов в координатах: *а* – stress-strain (прочность, Н/мм^2 – деформация, %); *б* – stress/density-strain (удельная прочность, Н/мм^2 / плотность, г/см^3 – деформация, %); удельная прочность – отношение временного сопротивления разрушению к плотности металла – $\sigma_в/\rho$) [5]

В качестве одного из весомых примеров применения алюминиевых сплавов в летательных аппаратах на рис. 2 приведены данные [6], из которых видно, что их доля в конструкциях широкофюзеляжных лайнеров фирмы Boeing составляет от 20 % (Boeing-787) до 81 % (Boeing-747) от суммарной массы всех используемых материалов (сталь, титановые сплавы, композиты).

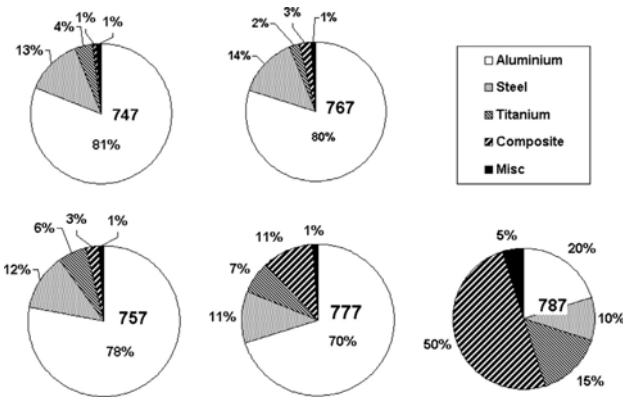


Рис. 2. Сплавы, применяемые в конструкциях широкофюзеляжных лайнеров фирмы Boeing [6]:
□ – Aluminium (алюминиевые сплавы)

Известно также применение алюминиево-магниевых сплавов и в ракетостроении. Так, по данным ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева» [7] корпуса первой и второй ступеней баллистической ракеты серии РС с жидкостным ракетным двигателем состоят из боковых оболочек, изготовленных из сплава системы Al–Mg.

Среди применяющихся в производстве ЛА алюминиевых литейных сплавов сплавы системы Al–Mg отличаются исключительно высокими механическими свойствами – в закаленном состоянии их временное сопротивление $\sigma_в$ находится в пределах 300…450 МПа, относительное удлинение δ – в пределах 10…25 %.

При этом в этой группе сплавов особенно высокими свойствами выделяется сплав АЛ27-1 [8], который в период освоения (в котором участвовал автор) имел условное название АЛ8У, а в настоящее время по ГОСТ 1583–93 имеет маркировку АМг10ч. Содержание магния в сплаве составляет 9,5–10,5 %. Сплав содержит также 0,05–0,15 % Ti и 0,05–0,20 % Zr, которые образуют в расплаве центры кристаллизации в виде частиц интерметаллических соединений – соответственно $TiAl_3$ и $ZrAl_3$. Кроме того, в сплаве содержится 0,05–0,15 % Be, который образует на поверхности жидкого металла защитную пленку BeO, так как при плавке в обычной воздушной атмосфере Al–Mg сплавов, содержащих от 2 до 12 % Mg, на поверхности жидкого металла образуется рыхлая пленка оксида магния MgO, имеющая аморфное строение [9], что приводит к насыщению расплава водородом и, как результат, к формированию в отливках пористости.

Действие бериллия на уменьшение окисляемости сплавов системы Al–Mg объясняется его высоким сродством к кислороду. Известно, что в результате введения 0,07 % Be в сплав Al – 10 % Mg снижается окисляемость сплава в 160 раз при выдержке 0,5 ч и в 225 раз при выдержке 6 ч при 750 °C [10].

В сплаве АМг10ч ограничивается содержание железа и кремния (не более 0,05 % каждого), так как они образуют нерастворимые примеси в виде интерметаллических соединений – соответственно Al_3Fe и Mg_2Si [11]. При этом частицы фазы Al_3Fe выделяются в пластинчатой и дендритной формах [12], а частицы Mg_2Si – в форме грубозернистых дендритов [13], что приводит к уменьшению механических свойств литых изделий. Однако в работе [14] установлено, что отрицательное влияние Al_3Fe можно предотвратить в результате введения в расплав марганца, воздействие которого заключается в уменьшении размеров частиц и изменении формы этого интерметаллида. В другой работе [15] установлено, что при введении в расплав висмута значительно уменьшаются размеры и изменяется морфология частиц Mg_2Si – от грубозернистых дендритов до полиэдров. Для усиления уверенности в нейтрализации вредного влияния Fe и Si в сплаве АЛ27-1 специально и ограничено их содержание, что отражено в присвоении сплаву градации – сплав повышенной чистоты [8].

Формовочная смесь. При всех положительных характеристиках алюминиево-магниевых сплавов для их достижения в получаемых из этих сплавов литых деталях требуется соответствующая «правильная» технология. В работе [8] указывается на сложность приготовления сплавов системы Al–Mg, в частности, при литье в песчано-глинистые формы, когда отливки могут поражаться газовой пористостью, возникающей в результате взаимодействия металла с влагой формы, что и подтвердилось в нашей работе при освоении литья деталей из сплава АМг10ч.

При этом автором работы [16] было принято такое объяснение влияния борной кислоты на блокирование образования пористости. При заливке в литейную песчано-глинистую форму, в состав которой входит вода, жидкий магнийсодержащий сплав нагревает борную кислоту, в результате чего ее растворимость в воде многократно увеличивается. Поэтому в приграничных с металлом объемах формы вместо воды присутствует пересыщенный раствор борной кислоты, при взаимодействии с которым образуются бораты магния $Mg_3B_2O_6$, $Mg_2B_2O_5$ и др., которые залечивают несплошности пленки окислов магния. Это объяснение, по сути, совпадает с тем, которое приводится в работе [17], согласно которому эффект присутствия в формовочной смеси борной кислоты связан с тем, что при заливке сплава в форму происходит нагрев борной кислоты, которая образовывает на поверхности зерен кварцевого песка тонкую пленку, инертную по отношению к жидкому металлу, но обладающую высоким сродством к кислороду, что и приводит к блокированию пор в форме, а следовательно, проникновению в них воды с последующим образованием из нее газовой пористости.

С целью предупреждения возможности возникновения этого дефекта, взяв за основу данные работы [17], согласно которой возникновение пористости в отливках из Al–Mg сплавов удалось предотвратить добавкой в формовочный состав борной кислоты с серой, и проанализировав результаты более поздней работы [18], в которой применение серы было исключено, очевидно, как санитарно-экологически вредное вещество, выделяющее при нагреве сернистые газы, а также данные работы [19], нами была разработан оптимальный состав формовочной смеси с добавкой только борной кислоты, при использовании которой газовая пористость в отливках конструкций ЛА из сплава АМг10ч была полностью исключена [20].

Доказательством эффекта присутствия в формовочной смеси борной кислоты, независимо от трактовки механизма ее воздействия, служат полученные нами данные по повышению плотности (определяли гидростатическим способом) и связанным с повышением этой характеристики увеличением механических свойств отливок из сплава АК9ч (табл. 1) [20].

Дегазация лигатур. Следует отметить, что одним из источников попадания газов в сплав АМг10ч могут служить применяемые для модифицирования лигатуры Al – 4,34 % Ti; Al – 3,40 % Zr, технология приготовления которых связана с применением высоких температур, что по определению способствует их газонасыщению, в основном водородом. С целью удаления водорода из указанных лигатур в настоящей работе их предварительно по отдельности переплавляли в течение 15 мин в вакуумной индукционной высокочастотной печи при 1100–1200 °С и разрежении 0,799–1,066 Па с последующей разливкой сплава слоем 15–20 мм в изложницы без снятия вакуума [21].

Таблица 1

Влияние содержания борной кислоты в формовочной смеси на плотность и механические свойства сплава АК9ч в отливках*

Наименование свойства	Свойства сплава при содержании H_3BO_3, %			
	0	1	4	6
ρ, кг/м^3	2528	2544	2548	2551
Прирост, %	–	0,6329	0,7911	0,9098
$\sigma_в$, МПа	365	380	415	427
Прирост, %	–	4,11	13,70	16,98
δ, %	18	21	23	25
Прирост, %	–	16,6	27,7	38,8
НВ,	80	85	85	85
Прирост, %	–	6,25	6,25	6,25

* Механические свойства модифицированного сплава АК9ч при литье в земляные формы: $\sigma_в \geq 230$ МПа; $\delta \geq 3{,}0$ %; НВ ≥ 70 ед.

Определение очередности загрузки шихтовых материалов. В состав сплава АМг10ч входят как тугоплавкие компоненты – титан, цирконий и марганец, так и легкоплавкие компоненты – магний и бериллий, к тому же обладающие высоким сродством к кислороду, т. е. легко окисляющиеся. При этом нами установлено [22], что при плавке сплава со значительно меньшим содержанием магния (сплав АЛ4 – по ГОСТ 1583–93 переименован в АК9ч – содержит 0,17–0,30 % Mg), чем содержит сплав АМг10ч (9,5–10,5 % Mg), без мер, препятствующих окислению магния при нагреве расплава до 850 °С, и заливке без выдержки его потери составляют 2,0 %, а до 1100 °С – 8,8 %. Следовательно, при плавке сплава АМг10ч, в котором содержится магния в 42,5 раза больше, чем в сплаве АК9ч, без соблюдения температурно-временных режимов плавки и без защитных мер от окисления потери магния будут более значительными.

Кроме того, с целью гарантии получения высоких механических свойств при изготовлении литых деталей ЛА, работающих в высоконагруженных условиях эксплуатации, в расплав дополнительно вводили в качестве модификатора бор [23] в объеме фторбората калия KBF_4 (0,7 масс. %), который образует при взаимодействии с алюминием соединение AlB_2, частицы которого служат дополнительными центрами кристаллизации [24].

С целью повышения коррозионной стойкости сплава в расплав вводили порядка 0,1 масс. % марганца, который нейтрализует присутствующие в расплаве железо и кремний, связывая их в результате перитектической реакции в интерметаллическое соединение α-AlMnFeSi [25].

Ввиду присутствия в шихте компонентов, отличающихся разной склонностью к окислению, а также температурами плавления, с целью получения требуемого состава и максимальных механических свойств сплава возникла необходимость определить очередность их расплавления. В качестве шихтовых материалов использовали чушковый алюминий марки А99 (99,99 % Al), чушковый магний марки Мг95 (99,95 % Mg) и лигатуры Al – 3,0 % Be ($T_{пл} \approx 660$ °С); Al – 4,34 % Ti ($T_{пл} \approx 950$ °С); Al – 3,40 % Zr ($T_{пл} \approx 800$ °С) и Al – 9,12 % Mn ($T_{пл} \approx 940$ °С).

Приготовление рабочих сплавов производили в высокочастотной индукционной печи в титановом тигле, окрашенном защитной краской (состава 75 г оксида цинка ZnO + 40 г жидкого стекла Na_2SiO_3 на 1 л воды), по разным вариантам с варьированием способов и очередности загрузки шихтовых материалов, температурно-временных режимов ведения плавки и выполнения других сопутствующих операций. Рафинирование сплава производили 0,3 % гексахлорэтана C_2Cl_6 в три приема. Исходную шихту предварительно очищали травлением в смеси кислот HCl : HNO_3 в соотношении 1,25 : 1,0.

По технологии А одновременно расплавляли алюминий и лигатуры Al–Be и Al–Ti, доводили температуру расплава до 780–800 °С, в три приема вводили фторборат калия KBF_4, после чего последовательно загружали лигатуры Al–Zr, Al–Mn и магний. Затем сплав рафинировали гексахлорэтаном. Заливку производили при 720–730 °С после 10-минутного выстаивания.

По технологии Б одновременно расплавляли алюминий и лигатуры Al–Be, Al–Zr и Al–Mn, доводили температуру расплава до 700…710 °С и вводили магний; доводили температуру до 720…730 °С и рафинировали сплав гексахлорэтаном, поднимали температуру до 780…800 °С и вводили в три приема KBF_4, снижали температуру до 730 °С, выстаивали 5 мин и производили заливку.

По технологии В сплав готовили по аналогии с вариантом А, с тем отличием, что в расплав вводили стружку титана марки ВТ5 – по технологии B_1 при 1300 °С без флюса, по технологии B_2 – при 800 °С с флюсом.

По технологии Г сплав готовили по аналогии с вариантом А, с тем отличием, что в сплав вводили при тех же температурах и при отсутствии и наличии флюса, что и в варианте В, иодидный цирконий (99,95 % чистоты) в объеме брикета, состоящего из 70 % порошкового циркония и 30 % алюминиевой стружки.

По каждой технологии проводили по 10 плавок. Полученные результаты усредняли (табл. 2), и их анализ показал, что механические свойства отливок по всем технологическим вариантам превышают требования ГОСТ 1583–93, причем наиболее высокие прочностные свойства были получены по технологии Б: $\sigma_в$ = 433 МПа; НВ = 92,6 ед. Прирост относительно ГОСТ 1583–93, соответственно, – 23,7 % и 23,4 %. А наиболее высокая пластичность – δ = 19,0 %, прирост относительно ГОСТ 1583–93 составляет 26,6 %.

По совокупности полученных технологических операций при приготовлении сплава и полученных в результате механических свойств отливок в качестве рабочей технологии была принята технология Б.

Таблица 2

Химический состав и механические свойства сплава АМг10ч, приготовленного по разным технологиям*

Технологии	Содержание компонентов, %						Механические свойства		
	Mg	Ti	Zr	Be	B	Mn	$\sigma_в$, МПа / прирост, %	δ, % / прирост, %	НВ, ед / прирост, %
Г	10,51	0,031	0,013	0,042	0,0044	0,12	353/0,85	17,1/14,0	75,6/0,8
А	10,50	0,027	0,061	0,041	0,0042	0,14	359/2,57	19,0/26,6	76,5/2,0
В	10,49	0,071	0,052	0,030	0,0094	0,11	386/10,28	18,7/24,6	82,6/10,1
Б	10,31	0,085	0,065	0,043	0,0044	0,09	433/23,7	17,5/16,6	92,6/23,4

* Химический состав сплава АМг10ч по ГОСТ 1583–93: 9,5–10,5 % Mg; 0,05–0,15 % Ti; 0,05–0,20 % Zr; 0,05–0,15 % Be; механические свойства при литье в земляные формы: $\sigma_в \geq 350$ МПа; δ ≥ 15,0 %; НВ ≥ 75 ед.

Высокотемпературная обработка расплава. Технологию температурной обработки расплава (ТОР) еще в 40-е годы прошлого столетия разработал и использовал при приготовлении сплава Al – 12 % Si известный специалист в области литейного производства профессор А. Г. Спасский [26]. В этой работе было установлено, что в результате перегрева жидкого сплава выше обычно применяемых «низкотемпературных» технологий, при кристаллизации дендриты α-твердого раствора и эвтектика формируются в виде тонкодисперсных структур, аналогичных структурам, получаемым при модифицировании сплава общепринятым тройным модификатором (45,0 % NaCl + 40 % NaF + 15 % Na_3AlF_6), что приводит к росту механических свойств отливок.

Аналогичные результаты были получены нами [27] при применении ТОР при работе со сплавом АК12 (Al – 10…13 % Si). При этом в процессе плавки сплав нагревали до 900…1000 °С (на 300…400 °С выше температуры плавления эвтектики Al–Si – 577 °С), затем охлаждали до 725…740 °С, производили модифицирование тройным модификатором и заливали в кокиль. Одновременно производили заливку неперегретого сплава. Результаты испытаний вырезанных из отливок стандартных образцов показали, что механические свойства «обычного» неперегретого сплава составляли $\sigma_в$ = 220 МПа, δ = 8,5 %, а для перегретого сплава $\sigma_в$ повысилось до 240 МПа (на 9,1 %), δ – до 12,2 % (в 1,4 раза). По ГОСТ 1583–93 требуется $\sigma_в \geq 160$ МПа, $\delta \geq 2{,}0$ %. При этом оказалось возможным уменьшить дозу модификатора до 0,5 масс. % (обычная доза – 2,0 %).

При разработке технологии авторы технологии ТОР исходили из установленного известным физиком В. И. Даниловым [28] факта существования в металлических жидкостях выше температуры плавления микрогруппировок, унаследованных от твердого металла (остатков твердой фазы), и возможности их разрушения при перегреве выше определенных температур. Такой же точки зрения на строение металлической жидкости придерживались в XX столетии многие известные отечественные и зарубежные ученые. И эта точка зрения на строение жидких металлов сохраняется и в наше время, о чем может свидетельствовать, например, современная работа [29], в которой рассмотрено 270 публикаций за период с 1859 г. по 2006 гг. (с 2000 по 2006 гг. – 58 публикаций или 21,5 %), кассающихся воздействия перегрева на строение жидких металлов и на их последующую кристаллизацию. Причем, как указано в этой работе, вопросами плавления и кристаллизации еще более 150 лет назад занимался и М. Фарадей.

Одним из подтверждений наличия структурных образований в металлической жидкости может служить установленное в результате термического анализа сплава Al – 16,0 % Si повышение температуры начала и увеличение интервала кристаллизации при увеличении температуры перегрева расплава (табл. 3) [30]. Очевидно, такое течение кристаллизации объясняется тем, что в связи разрушением при перегреве предкристаллизационных образований для инициирования этого процесса требуется большее время.

Таблица 3

Влияние перегрева жидкого сплава Al – 16,0 % Si на характеристики кристаллизации

Температура перегрева расплава, °С (температура ликвидус 630 °С)	720,0	770,0	800,0	810,0	830,0	870,0
Температура начала кристаллизации, °С	597,5	602,5	609,5	612,5	619,0	619,5
Интервал кристаллизации, °С	62,5	67,5	74,0	76,5	75,0	84,5

В настоящей работе ТОР сплава АМг10ч производили по следующей технологии. Сплав готовили в индукционной печи и при повышении температуры производили заливку проб с 660, 720, 750, 800, 860 и 930 °С. Анализ результатов испытаний механических свойств вырезанных из деталей образцов показал, что оптимальное сочетание прочности и пластичности дает заливка с 750 °С: $\sigma_в$ = 445 МПа, δ = 30 %, НВ = 95 ед. При дальнейшем повышении температуры прочность несколько повышается и при заливке с 930 °С $\sigma_в$ составляет 450 МПа, тогда как удлинение при этом снижается до δ = 25,3 %, твердость остается на том же уровне. Анализ оптических снимков микроструктуры показал, что с повышением температуры перегрева и заливки зерна α-твердого раствора сплава измельчаются и утоняются выделения β-фазы по границам зерен. Более высокие увеличения (Х 10 000) показали, что при низкой температуре литья зерна α-твердого раствора состоят из отдельных блоков с выраженными между ними границами, тогда как при более высоких температурах структура зерен становится однородной, а сплошность выделений β-фазы нарушается. Очевидно, такие изменения структуры и являются причиной роста механических свойств отливок из сплава АМг10ч.

Рост механических свойств с повышением температуры заливки подтвердился и при литье из сплава АМг10ч деталей ЛА с «крыльчатки» (лопатки оформлялись песчаным стержнем), которая работает в режиме высоких оборотов при перекачке жидкости, и «кронштейна» (земляная форма), испытывающего высокие статические нагрузки. Максимальные свойства первой детали ($\sigma_в$ = 410 МПа, δ = 33 %, НВ = 93 ед.) были получены при температуре литья, равной 800 °С, второй ($\sigma_в$ = 390 МПа, δ = 28 %, НВ = 95 ед.) – при заливке с 860 °С.

Фильтрование жидкого сплава. Ввиду того, что с повышением температуры расплава усиливаются процессы окисления и газонасыщения [31], что должно ухудшать качество отливаемых деталей, была проведена работа по предотвращению негативных последствий перегрева путем фильтрования металла в процессе заливки. При этом сплав АМг10ч заливали в форму через магнезитовую крошку ($MgCO_3$) с размером частиц 10…15 мм, помещенную в графитошамотовый тигель с отверстием в донной части, который устанавливали над стояком литейной формы. Перед заливкой сборку «тигель–крошка» нагревали. Результаты испытаний механических свойств отливок показали, что максимальные свойства ($\sigma_в$ = 430 МПа,

δ = 36 %, HB = 95 ед.) были получены при заливке с 750 °С, тогда как при заливке без фильтрования они оказались ниже: $\sigma_в$ = 400 МПа (меньше на 7,5 %), δ = 30 % (меньше на 20 %), HB = 95 ед.

Осмотр кусочков отработанного фильтра показал, что их поверхность оказалась покрытой белым налетом, представляющим собой окисные пленки.

При этом следует отметить более высокую плотность (определяли методом гидростатического взвешивания) и отсутствие пористости в отливках (определяли на шлифах) из фильтрованного сплава (табл. 4), что является определенным вкладом в повышение механических свойств. Видно также, что плотность фильтрованного сплава при всех температурах заливки выше, чем плотность нефильтрованного, и при этом плотность последнего с повышением температуры заливки существенно понижается, что и проявляется в наличии пористости, тогда как на фильтрованном сплаве пористость отсутствует. Причем, если при самой низкой температуре заливки (660 °С) разница плотностей составляет только 0,54 %, то при самой высокой температуре (1030 °С) плотность нефильтрованного сплава уменьшается на 2,15 %, а фильтрованного – только на 0,54 %, т. е. в 4 раза меньше.

Таблица 4

Влияние фильтрации на плотность сплава АМг10ч

Состояние сплава	Температура заливки, °С			
	660	750	950	1030
	Плотность сплава, ρ, кг/м^3			
Нефильтрованный	2564 пор нет	2530 поры 3 балла	2520 поры 3–4 балла	2510 поры 3–4 балла
Фильтрованный	2578 пор нет	2575 пор нет	2575 пор нет	2564 пор нет

Применение устройства типа «тепловая труба» при заливке металла в форму. Следует при этом отметить, что при использовании технологии ТОР важным фактором является быстрое снятие перегрева жидкого металла при заливке в литейную форму с целью сохранения гомогенного состояния сплава, достигнутого в результате перегрева и блокирования процесса восстановления разрушенных при перегреве микрогруппировок. С этой целью в работе применяли теплообменное устройство, работающее по принципу «тепловая труба» [32]. За время прохождения перегретого расплава через металлопровод устройства, соответствующее обычной длительности этой операции, его температура снижается до обычной, более низкой, температуры. Применение указанного устройства показало [33] положительные результаты при литье ответственных деталей из сложнолегированного алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg с добавками Cu, Ti, Zr и Be в пределах 0,1…0,3 % каждого. Так, если при заливке сплава с 850 °С $\sigma_в$ = 310 МПа, δ = 9,7 %, то при заливке с применением устройства $\sigma_в$ повышается до 325 МПа (на 4,9 %), δ – до 11,8 % (на 21,6 %).

Заключение. В результате проведенной работы были усовершенствованы и разработаны новые технологии, способы и средства, используемые при изготовлении литых деталей и конструкций летательных аппаратов из сплава АМг10ч. В связи с тем, что сплав АМг10ч содержит магний, и сплав проявляет склонность к окислению при взаимодействии с атмосферой и к газонасыщению при взаимодействии с влагой формовочной смеси, были разработаны и использованы на практике следующие мероприятия: 1) введение в формовочную смесь борной кислоты; 2) дегазация лигатур алюминий–цирконий и алюминий–титан; 3) разработан оптимальный порядок расплавления шихтовых материалов; 4) применена высокотемпературная обработка расплава; 5) фильтрация сплава при заливке в форму с использованием устройства типа «тепловая труба», обеспечивающего быстрое снижение температуры перегретого сплава. Все эти мероприятия, как по отдельности, так и применение некоторых в комплексе, обеспечили получение литых деталей из сплава АМг10ч с требуемыми и повышенными механическими свойствами. Причем отмечается воспроизводимость результатов испытаний механических свойств отливок из разных плавок.

Библиографические ссылки

1. Aluminium alloys for aircraft structures. Introduction to Aerospace Materials. 2012. P. 173–201.
2. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2001. № 1. С. 5–9.
3. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // Revie Materials & Design. April 2014. Vol. 56. P. 862–871.
4. Moreto J. A. [et al.]. SVET, SKP and EIS study of the corrosion behaviour of high strength Al and Al–Li alloys used in aircraft fabrication // Corrosion Science. 2014. Vol. 84. P. 30–41.
5. Codden R. Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys. Training in aluminium application technologies. Alcan. Banbury : European Aluminium Association, 1994. 60 p.
6. Warren A. S. Developments and challanges for aluminiu. A Boeing perspective // Materials Forum. 2004. Vol. 28. P. 24–31.
7. ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева». URL: http://makeyev.ru/roccomp/3rd/r29r.
8. Колобнев И. Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. 2 изд. перераб. и доп. М. : Металлургия, 1966. 395 с.
9. Li H-T [et al.]. Oxides in Liquid Metals and Alloys. BCAST // Brunel Centre for Advanced Solidification Technology. BCAST, Brunel University, Uxbridge, Middlesex, UB8 3PH, UK. P. 93–110.
10. Окисная пленка, образующаяся на поверхности. Международная выставка оборудования и технологии обработки. Выставка Технофорум 2014. URL: http://filebar.kg/metalurgia_svarki/120-okisnaya-plenka-obrazuyuschayasya-na-poverhnosti.html.
11. Аристова Н. А., Колобнев И. Ф. Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов. М. : Металлургия. 1977. 144 с.

12. Чеверикин В. В., Хван А. В., Золоторевский В. С. Изменение морфологии железосодержащих фаз в алюминиевых сплавах // Вестник ТГТУ. 2012. Том 18, № 3. С. 742–748.

13. Lingying Ye. [et al.]. Modification of Mg_2Si in Mg–Si alloys with gadolinium // Materials Characterization. 2013. Vol. 79. P. 1–6.

14. Shouxun Ji. [et al.]. Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al–Mg–Si–Mn and Al–Mg–Si diecast alloys // Materials Science & Engineering: A. 2013. Vol. 564. P. 130–139.

15. Guo E. J., Ma B. X., Wang L. P. Modification of Mg_2Si morphology in Mg–Si alloys with Bi // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 206, Iss. 1–3, P. 161–166.

16. А. с. 1828418 СССР, B22C 1/06. Формовочная смесь для литья магниевых сплавов / Ю. В. Чесноков. Заявка № 4856877/02 от 25.06.1990. Бюл. № 26. 1993.

17. Player E. The Properties and Practical Processes in the Production of Magnesium Alloy Castings with Special Reference to Elektron // Aircraft Engineering. 1929. P. 175–178.

18. Никитина М. Ф. Формовочные материалы для изготовления форм при литье сплавов алюминий–магний. М. : Оборонгиз, 1963. 192 с.

19. Friedrich H. E., Mordike B. L. Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 647 p.

20. Крушенко Г. Г. Влияние добавок в формовочную смесь борной кислоты на свойства отливок из Al-сплавов // Литейное производство. 2012. № 10. С. 27–29.

21. Пат. 2430177 Российская Федерация, C1 МПК C22C 1/03. Способ получения литейного алюминиево-магниевого сплава / Крушенко Г. Г. Заявка № 2010100057/02 от 11.01.2010. Бюл. № 27. 2011.

22. Крушенко Г. Г., Ловцов Д. П. Потери магния при плавке сплава АЛ4 // Цветная металлургия. 1965. № 7. С. 40–41.

23. А. с. SU № 960921, C22C/06 Модификатор для обработки литейных алюминиевых сплавов / В. В. Шурыгин, Ф. В. Есаков. А. М. Авдентов. Л. С. Потанин. Заявка № 3270731 от 10.04.1981. Бюл. № 35. 1982.

24. Qing-liang WANG [et al.]. Production of Al-B master alloys by mixing KBF_4 salt into molten aluminum // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013. Vol. 23. Iss. 1. P. 294–300.

25. Warmuzek M., Rabczak K., Sieniawski J. The course of the peritectic transformation in the Al-rich Al–Fe–Mn–Si alloys // J. of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 162–163. P. 422–428.

26. Спасский А. Г., Рогожин В. В. К вопросу о модификации силуминов // Юбилейный сборник научных трудов МИЦМиЗ. 1930–1940. № 9. М. : Металлургиздат. 1940. С. 566–567.

27. А. с. 412270 СССР, C22C1/02, B22D21/04. Способ приготовления алюминиево-кремниевых сплавов / Г. Г. Крушенко, П. А. Финогенов, С. И. Торшилова и др. Заявка № 1802617 от 27.06.1972. Бюл. № 3. 1974.

28. Данилов В. И. Рассеяние рентгеновских лучей в жидкостях. Л.–М. : ОНТИ. 1935. 183 с.

29. Mei Q. S., Lu K. Melting and superheating of crystalline solids: From bulk to nanocrystals // Progress in Materials Science. 2007. Vol. 52. Iss. 8. P. 1175–1262.

30. Арабей А. В., Рафальский И. В. Компьютерный термический анализ для контроля фазовых переходов заэвтектических силуминов с учетом влияния температурной обработки расплава // Новые материалы и технологии их обработки : IX Республиканская студенческая науч.-техн. конф. Минск : УП «Технопарк БНТУ «Метолит». 2008. С. 17–20.

31. Воеводина М. А., Крушенко Г. Г. Фильтрование металлических расплавов. Абакан : Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета. 2013. 80 с.

32. А. с. № 1046006 СССР, B22D11/112. Устройство для охлаждения металла / Ф. М. Черномуров, Г. Г. Крушенко, С. В. Федоров и др. Бюл. № 37. 1983.

33. Крушенко Г. Г., Хайкин А. Л., Торшилова С. И. Температурная обработка в жидком состоянии сложнолегированного сплава системы Al–Si–Mg с целью повышения механических свойств отливок // Известия высших учебных заведений // Цветная металлургия. 1983. № 5. С. 97–99.

References

1. Aluminium alloys for aircraft structures. *Introduction to Aerospace Materials*, 2012, P. 173–201.

2. Fridljander I. N. [Aluminum alloys in aircraft during periods from 1970 to 2000 and from 2001 to 2015]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, 2001, no. 1. p. 5–9. (In Russ.)

3. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Revie Materials & Design*, April 2014, Vol. 56, P. 862–871.

4. Moreto J. A. et al. SVET, SKP and EIS study of the corrosion behaviour of high strength Al and Al–Li alloys used in aircraft fabrication. *Corrosion Science*, July 2014, Vol. 84, P. 30–41.

5. Codden R. Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys. Training in aluminium application technologies. Alcan. Banbury: European Aluminium Association. 1994. 60 p.

6. Warren A. S. Developments and challanges for aluminiu. A Boeing perspective. *Materials Forum*. 2004. Vol. 28. P. 24–31.

7. *OAO "Gosudarstvennyy raketnyy tsentr imeni akademika V. P. Makeyeva"* [OJSC "State rocket center named after academician V. P. Makeyev"] (In Russ.) Available at: http://makeyev.ru/roccomp/3rd/r29r.

8. Kolobnev I. F. *Termicheskaja obrabotka aljuminievyh splavov. Vtoroe pererab. i dop. izd.* [Heat treatment of aluminum alloys. Second Rev. and ext. ed.]. Moscow, Metallugy Publ., 1966, 395 p.

9. Li H-T et al. Oxides in Liquid Metals and Alloys. BCAST. *Brunel Centre for Advanced Solidification Technology*. BCAST, Brunel University, Uxbridge, Middlesex, UB8 3PH, UK. P. 93–110.

10. *Mezhdunarodnaja vystavka oborudovanie i tehnologii obrabotki. Vystavka Tehnoforum 2014.* [The oxide film formed on the surface]. (In Russ.) Available at:

http://filebar.kg/metalurgia_svarki/120-okisnaya-plenka-obrazuyuschayasya-na-poverhnosti.html.

11. Aristova N. A., Kolobnev I. F. *Termicheskaja obrabotka litejnyh aljuminievyh splavov.* [Heat treatment of cast aluminum alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977, 144 p.

12. Cheverikin V. V., Hvan A. V., Zolotorevskij V. S. [The change in the morphology of iron-containing phases in aluminum alloys]. *Vestnik TGTU*. 2012, vol. 18, no. 3, p. 742–748. (In Russ.)

13. Lingying Ye. et al. Modification of Mg_2Si in Mg-Si alloys with gadolinium. *Materials Characterization*. May 2013, Vol. 79, P. 1–6.

14. Shouxun Ji. et al. Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al–Mg–Si–Mn and Al–Mg–Si diecast alloys. *Materials Science & Engineering: A*. 1 March 2013, Vol. 564, P. 130–139.

15. Guo E. J., Ma B. X., Wang L. P. Modification of Mg_2Si morphology in Mg–Si alloys with Bi. *Journal of Materials Processing Technology*, 12 September 2008, Vol. 206, Issues 1–3, P. 161–166.

16. Chesnokov Ju. V. Formovochnaja smes' dlja lit'ja magnievyh splavov [Molding sand for casting magnesium alloys]. A. s. USSR, no. 1828418, 1993.

17. Player E. The Properties and Practical Processes in the Production of Magnesium Alloy Castings with Special Reference to Elektron. *Aircraft Engineering*, July 1929, P. 175–178.

18. Nikitina M. F. *Formovochnye materialy dlja izgotovlenija form pri lit'e splavov aljuminij-magnij* [Molding materials for the production of moulds for casting alloys aluminium-magnesium], Moscow, Oborongiz Publ., 1963, 192 p.

19. Friedrich H. E., Mordike B. L. *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 647 p.

20. Krushenko G. G. [The influence of additives in the molding mixture of boric acid on the properties of cast Al-alloys]. *Litejnoe proizvodstvo*, 2012, no. 10, p. 27–29. (In Russ.)

21. Krushenko G.G. *Sposob poluchenija litejnogo aljuminievo-magnievogo splava* [A method of obtaining a casting of aluminum-magnesium alloy]. Patent RF, no. 2430177, 2010.

22. Krushenko G. G., Lovcov D. P. [Loss of magnesium smelting alloy AL4]. *Cvetnaja metallurgija*, 1965, no. 7, p. 40–41. (In. Russ.)

23. Shurygin V. V., Esakov F. V., Avdentov A. M. i dr. *Modifikator dlja obrabotki litejnyh aljuminievyh splavov* [The modifier for the processing of casting aluminum alloys]. Patent RF, no. 960921. 1982.

24. Qing-liang WANG et al. Production of Al-B master alloys by mixing KBF_4 salt into molten aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, January 2013, Vol. 23, Issue 1, P. 294–300.

25. Warmuzek M., Rabczak K., Sieniawski J. The course of the peritectic transformation in the Al-rich Al-Fe-Mn-Si alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 15 May 2005, Vol. 162–163, P. 422–428.

26. Spasskij A. G., Rogozhin V. V. [To the question of modification of silumins]. *Jubilejnyj sbornik nauchnyh trudov MICMiZ*. 1930–1940. no. 9. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1940, p. 566–567.

27. Krushenko G. G., Finogenov P. A., Torshilova S. I. i dr. *Sposob prigotovlenija aljuminievo-kremnievyh splavov* [The method of preparation of aluminum-silicon alloys]. Patent RF, no. 412270, 1974.

28. Danilov V. I. *Rassejanie rentgenovskih luchej v zhidkostjah* [*X-ray scattering in liquids*]. Leningrad-Moscow, ONTI Publ., 1935, 183 p.

29. Mei Q. S., Lu K. Melting and superheating of crystalline solids: From bulk to nanocrystals. *Progress in Materials Science*, November 2007, Vol. 52, Issue 8, P. 1175–1262.

30. Arabej A. V., Rafal'skij I. V. [Computer thermal analysis for monitoring phase transitions samachisa silumins with the influence of temperature melt processing]. *Novye materialy i tehnologii ih obrabotki: IX Respublikanskaja studencheskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija*. [New materials and processing techniques: IX Republican student scientific and technical conference]. Minsk, UE “Technopark BNTU “Metolit”, 2008, p. 17–20. (In Russ.)

31. Voevodina M. A., Krushenko G. G. *Fil'trovanie metallicheskih rasplavov.* [Filtering metallic melts]. Abakan, Hakasskij tehnicheskij institut – filial Sibirskogo federal'nogo universiteta Publ., 2013, 80 p.

32. Chernomurov F. M., Krushenko G. G., Fedorov S. V. i dr. *Ustrojstvo dlja ohlazhdenija metalla* [Device for cooling metal]. Patent Rf, no. 1046006, 1983.

33. Krushenko G. G., Hajkin A. L., Torshilova S. I. [The temperature of the processing liquid complex-alloyed alloy system Al-Si-Mg to improve the mechanical properties of castings]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Cvetnaja metallurgija*, 1983, no. 5, p. 97–99. (In Russ.)

© Крушенко Г. Г., 2014

УДК 631.1

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 210–216

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ НЕФТЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЗОНДА

К. В. Музалевский, В. Л. Миронов

Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, Академгородок, 50/38
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

Изложены результаты эксперимента по зондированию модельной среды нефтегазового коллектора с использованием лабораторного макета сверхширокополосного электромагнитного скважинного зонда. С этой целью был сконструирован деревянный бак, заполненный модельной средой. Модельная среда нефтегазового коллектора изготавливалась на основе смеси песка и водного раствора поваренной соли. Деревянный бак, заполненный модельной средой нефтегазового коллектора, размещался в лабораторном помещении на бетонной стяжке. Антенны скважинного зонда были размещены в полиэтиленовую водонепроницаемую трубку, на дне бака. Антенны зонда были выполнены в виде дипольных антенн с расширенной полосой пропускания. Передающая антенна подключалась к импульсному сверхширокополосному генератору, приемная антенна подключалась к стробоскопическому осциллографу. Запись напряжения на выходе антенны осуществлялась при различной толщине слоя модельной среды над антеннами и различном расстоянии между передающей и приемной антеннами. Подобная схема эксперимента позволила измерить коэффициент затухания и скорость распространения амплитуды зондирующего импульса в модельной среде нефтегазового коллектора. Показано, что теоретическая модель скважинного зонда с применением метода дискретных источников хорошо прогнозирует временную форму и время задержки зондирующего импульса. Предложен способ определения толщины слоя модельной среды нефтегазового коллектора по измеренным значениям временной задержки импульса, отраженного от границы слоя, при различных расстояниях между передающей и приемной антеннами зонда. Данный способ позволил определить расстояние до границы модельной среды нефтегазового коллектора с относительной погрешностью 2,2 % без привлечения априорной информации об электрофизических свойствах среды. Экспериментальные результаты, полученные в данной работе, создают научную основу для разработки и тестирования импульсных скважинных зондов, предназначенных для каротажа нефтегазовых скважин в нефтегазовом коллекторе с горизонтальным завершением. Для отработки созданных методов и технологий необходимо создание опытного образца скважинного зонда и проведение дальнейших исследований в полевых условиях.

Ключевые слова: нефтегазовый коллектор, скважинный радар, сверхширокополосные импульсы.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 210–216

THICKNESS MEASURING OF MODELED OIL-SATURATED ROCK WITH NANOSECOND BOHOLE ELECTROMAGNETIC LOGING TOOL

K. V. Muzalevskiy, V. L. Mironov

The Institute of Physics of the Academy of Sciences
50, bld. 38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

The paper presents the experimental results of sounding a wet sand-air interface using a laboratory model of a borehole GPR. For this purpose a box filled moist sand moisturized with brine was built. The box was located in a laboratory room on a concrete screed. Radar antennas were housed in a waterproof plastic pipe on the bottom of the box. Radar antennas were made in the form of dipoles with extended bandwidth. The transmitting antenna was connected to the generator, the receiving antenna to the stroboscopic oscilloscope. With variation of thickness of a sand layer over the antennas and the distance between the transmitting and receiving antennas the signals of receiving pulses were recorded. An attenuation coefficient of amplitude and propagation velocity of broadband pulse were measured. It is shown that the theoretical model borehole GPR, created by authors using the method of discrete sources, well predicts a temporary shape and time delay of the pulse reflected from the boundary layer. A method for determining the thickness of the layer of wet sand from the measured time delay of the pulse reflected from the boundary layer at different distances between the transmitting and receiving antennas radar was proposed. This

method allows to determine the distance to the interface with a relative error of 2.2 % without the involvement of a priori information on the electro physical properties of the medium in the layer. The results of this study allow you to plan and start bench testing of prototypes borehole probes.

Keywords: oil and gas reservoir, borehole radar, UWB pulses.

Введение. По мере развития технологий разработки нефтяных залежей все возрастающую роль начинает играть бурение горизонтальных стволов, которое обеспечивает существенное повышение эффективности извлечения углеводородного сырья [1–5]. Одной из наиболее важных проблем при проводке таких скважин является определение их местоположения относительно внешних и внутренних границ вскрываемого нефтенасыщенного коллектора. В последнее время авторами разработана новая технология сверхширокополосного импульсного скважинного каротажа нефтегазовых скважин с горизонтальным завершением [5–10], создана теоретическая модель импульсного сверхширокополосного (СШП) скважинного зонда. С целью тестирования созданной теоретической модели [11–13] скважинного зонда и экспериментального подтверждения возможности каротажа границ в слоистых средах нефтегазового коллектора с помощью СШП-импульсов, проведен эксперимент по зондированию границы слоя модельной среды нефтегазового коллектора с применением разработанного нами лабораторного макета скважинного зонда и специально созданного измерительного стенда. Исследуется затухание и скорость распространения зондирующих импульсов в модельной среде нефтегазового коллектора. В приемопередатчике радара использовались простейшие вибраторные антенны. Передающая антенна возбуждалась биполярным импульсом с длительностью 0,3 нс. Измерения проводились в специальном баке в виде прямоугольного параллелепипеда, который заполнялся влажным песком. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность такой модельной среды соответствовала петрофизическим характеристикам нефтенасыщенного слоя нефтегазового коллектора [5].

Описание экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Деревянный бак размером (1,34 м × 0,6 м × 0,5 м) устанавливался на поверхности грунта и заполнялся влажным песком. Антенны передатчика *T* и приемника *R* размещались в полиэтиленовой трубке диаметром 1 см и длиной 1,5 м, расположенной на высоте 5 см от дна бака. Концы полиэтиленовой трубки выходили наружу через отверстия, сделанные в торцевых стенках бака. Пространство над приемопередатчиком заполнялось слоем песка, переменной толщины *D*. Верхняя граница слоя песка контактировала с воздушной средой или плоским металлическим листом размером 1,2 м × 0,5 м.

Передающая и приемная антенны представляют собой идентичные полуволновые вибраторы, изготовленные из латунной трубки с внешним диаметром 6,6 мм. Конструкции антенн аналогичны [14; 15]. Плечи вибраторной антенны имели длину 3 см, а зазор между ними был равен 4 мм (рис. 2). Передающая и приемная антенна соединялись с генератором и осциллографом с помощью 50 Ом коаксиального кабеля (RG-58 A/U). Экран и внутренняя жила кабеля омически соединялись с плечами вибратора. Кабель пропускался через внутреннюю полость вибратора, ближайшего к генератору или усилителю, чтобы его конец оказался в зазоре между вибраторами. Для придания жесткости конструкции вибраторная антенна помещена в термоусадочную трубку. Внешний вид антенны изображен на рис. 2.

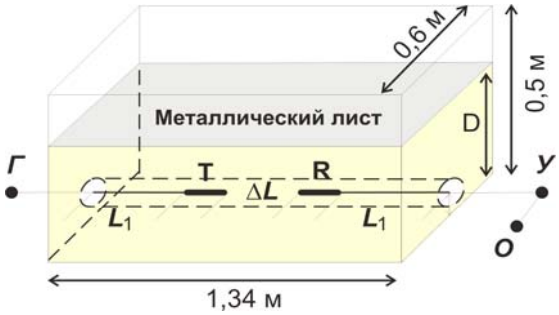


Рис. 1. Схема лабораторного радарного стенда

Рис. 2. Фотография антенны

На выходе генератора Г (рис. 1) создавался видеоимпульс с амплитудой 30 В и длительностью 0,3 нс (генератор фирмы «Трим», ТМГ300030Р01). Стробоскопический осциллограф О (фирма «Трим», TMR8120M) позволил проводить измерения напряжения и формы импульса в полосе частот 0–20 ГГц при уровне шума 3 мВ. Временная форма импульса на выходе генератора, ослабленного на 36 дБ, и его спектр, полученные с помощью стробоскопического осциллографа, приведены на рис. 3.

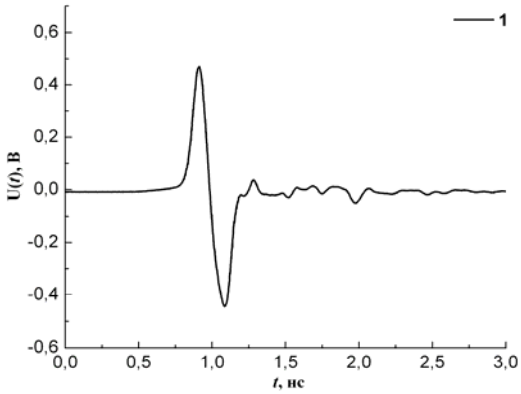
Частота спектра в точке максимума равна 2,2 ГГц, а ширина спектра Δf по уровню 0,5 составляет $\Delta f_{0,5} = f_{max} - f_{min} = 3{,}63$ ГГц ($f_{max} = 4{,}39$, $f_{min} = 0{,}76$). Коэффициент широкополосности импульса на выходе генератора, определенный по формуле $\Delta F = 2(f_{max} - f_{min})/(f_{max} + f_{min})$, равен 1,42. Данный импульс является широкополосным ($\Delta F > 1$). Отношение ширины спектра импульса к его центральной частоте равно 1,65 и близко к коэффициенту широкополосности.

Характеристики импульса, излучаемого в среду. На рис. 4 и 5 представлена временная форма и спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны при расположении антенн на расстоянии 0,23 м друг от друга при толщине слоя песка 0,45 м. Этот импульс

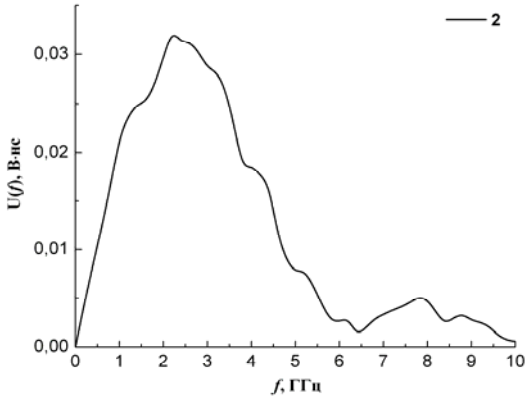
содержит, кроме прямой волны, распространяющейся из излучающей антенны в приемную, также и волны, отраженные от дна, стенок, торцов бака и границы «воздух–песок». Так как амплитуды отраженных импульсов много меньше амплитуды импульса прямой волны, то импульс, изображенный на рис. 4, можно приближенно принять за импульс, излучаемый в среду. Спектр этого импульса показан на рис. 5. Искажение временной формы этого импульса по сравнению с импульсом на выходе генератора (рис. 3), вызвано тем, что ширина амплитудно-частотной характеристики примененной вибраторной антенны меньше, чем ширина спектра импульса на входе в антенну. В результате фильтрации ширина спектра импульса на выходе приемной антенны уменьшилась, а его длительность, соответственно, увеличилась. На рис. 4 показана также огибающая комплексного аналитического сигнала, соответствующего данному импульсу (далее – огибающая импульса), которая была рассчитана как модуль амплитуды комплексного аналитического сигнала.

Длительность излученного в среду импульса (по уровню 0,2 от максимума огибающей импульса) равна 1,5 нс. Параметры частотного спектра импульса, излучаемого в среду, оказались следующие: частота спектра в точке максимума равна 2,7 ГГц, ширина спектра $\Delta f_{0,5}$ = 1,1 ГГц, коэффициент широкополосности ΔF = 0,4. Излучаемый в среду импульс является узкополосным (ΔF < 1). Рассмотрим далее процесс отражения зондирующего импульса от верхней границы слоя песка.

Временные формы отраженных импульсов. На рис. 6 представлены временные формы импульсов напряжения на выходе приемной антенны в зависимости от расстояния между антеннами ΔL и при толщине слоя песка, равной 0,45 м. На рис. 6 в левом и правом столбцах приведены формы отраженных импульсов в случае отсутствия и наличия металлического листа на верхней границе слоя песка. Использование металлического листа позволяет идентифицировать отраженный импульс (положение отмечено на рис. 6 вертикальной линией с индексом (c)). Импульс, имеющий время задержки порядка 4 нс (отмечен положением вертикальной линии с индексом (b)), был идентифицирован как импульс, отраженный от боковых стенок бака. Первой вертикальной линией слева на рис. 6 обозначен импульс, соответствующий прямой волне, распространяющейся от излучающей антенны в приёмную антенну по наиболее короткому пути.



а



б

Рис. 3. Импульс напряжения (*а*) и спектр (*б*) выходного сигнала генератора

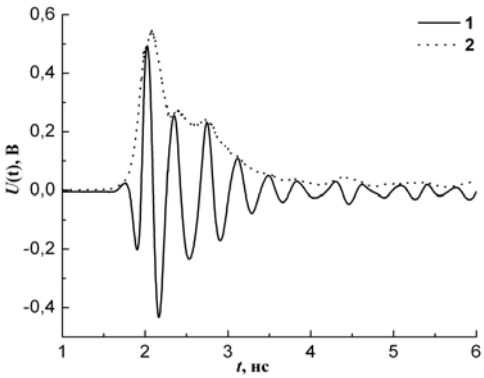


Рис. 4. Импульс напряжения на выходе приемной антенны (1) и его огибающая (2)

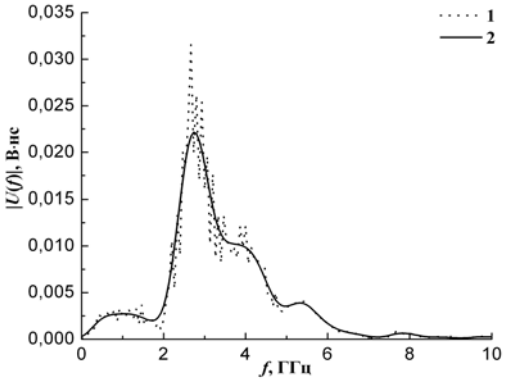


Рис. 5. Спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны: 1 – первичные экспериментальные данные, 2 – результат сглаживания первичных данных

Далее рассмотрим отражение импульсов от верхней границы слоя песка, накрытого металлическим листом. Временные формы импульсов на выходе приёмной антенны и соответствующие им огибающие при разносе антенн на расстояние ΔL = 23, 43 и 63 см показаны на рис 7. Как видно из временных зависимостей, приведенных на рис. 7, при увеличении расстояния ΔL между антеннами амплитуда прямого импульса, прошедшего в приемную антенну без отражений, существенно уменьшается, а запаздывание максимума огибающей импульса, отраженного от верхней границы слоя песка, увеличивается, так как эффективное расстояние

$$l_{эф} = \sqrt{4D^2 + \Delta L^2}\ , \qquad (1)$$

пройденное этим импульсом, возрастает.

На рис. 7 также видно, что при распространении на бóльшие расстояния амплитуда максимума огибающей отраженного импульса уменьшается за счет поглощения в среде и расходимости сферической волны, излучаемой антенной. Если принять приближение геометрической оптики для определения эффективной длины трассы (см. формулу (1)), проходимой импульсом, то можно определить скорость распространения импульсов, измеряя время задержки. Кроме того, можно определить коэффициент затухания импульсов, распространяющихся во влажном песке, измеряя амплитуды огибающей импульсов, отраженных от верхней границы слоя песка.

Затухание и скорость распространения импульсов. В результате обработки данных эксперимента, подобных приведенным на рис. 7, были измерены амплитуды огибающих U_{ma}, и времена прихода T_{ma}, отраженных импульсов в зависимости от эффективной длины трассы распространения, которая изменялась при разносе антенн (см. формулу (1)). Зависимости величины U_{ma} в децибельной шкале от эффективного расстояния, проходимого отраженными импульсами, изображена на рис. 8. Значения напряжений были нормированы на напряжение импульса, соответствующее разносу антенн ΔL = 0,53 м. Эффективное расстояние $l_{эф}$, соответствующее этому разносу антенн, равно 1,04 м. Кроме того, при вычислении нормированной величины напряжения импульса по формуле

$$P_a(l_{эф}) = 10\lg\frac{U_{ma}(l_{эф})\cdot l_{эф}}{U_{ma}(l_{эф} = 1{,}04)\cdot 1{,}04\ м} \qquad (2)$$

было скомпенсировано уменьшение амплитуды импульсной волны за счет сферической расходимости. Как видно из рис. 8, в полулогарифмической шкале амплитуда импульсной волны убывает с расстоянием по линейному закону, что соответствует экспоненциальному закону ослабления с постоянным коэффициентом затухания.

Линейная регрессия, описывающая затухание амплитуды огибающей импульса напряжения в зависимости от пройденного импульсом эффективного расстояния $l_{эф}$, имеет вид

$$P_{ma}(l_{эф}) = 21{,}28 - 25{,}30\ l_{эф},\ \ 1{,}04\ м < l_{эф} < 1{,}19\ м. \qquad (3)$$

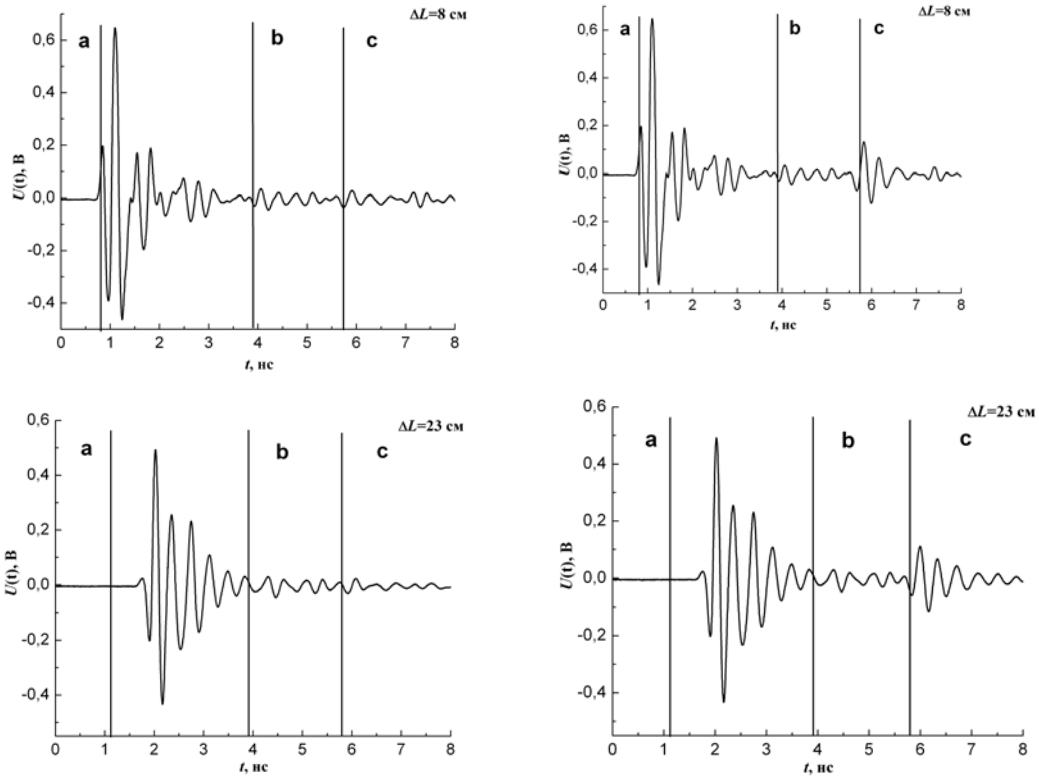


Рис. 6. Импульсы напряжения на выходе приемной антенны, соответствующие прямой волне (a) и волнам, отраженным от верхней границы слоя песка (c) и стенок бака (b)

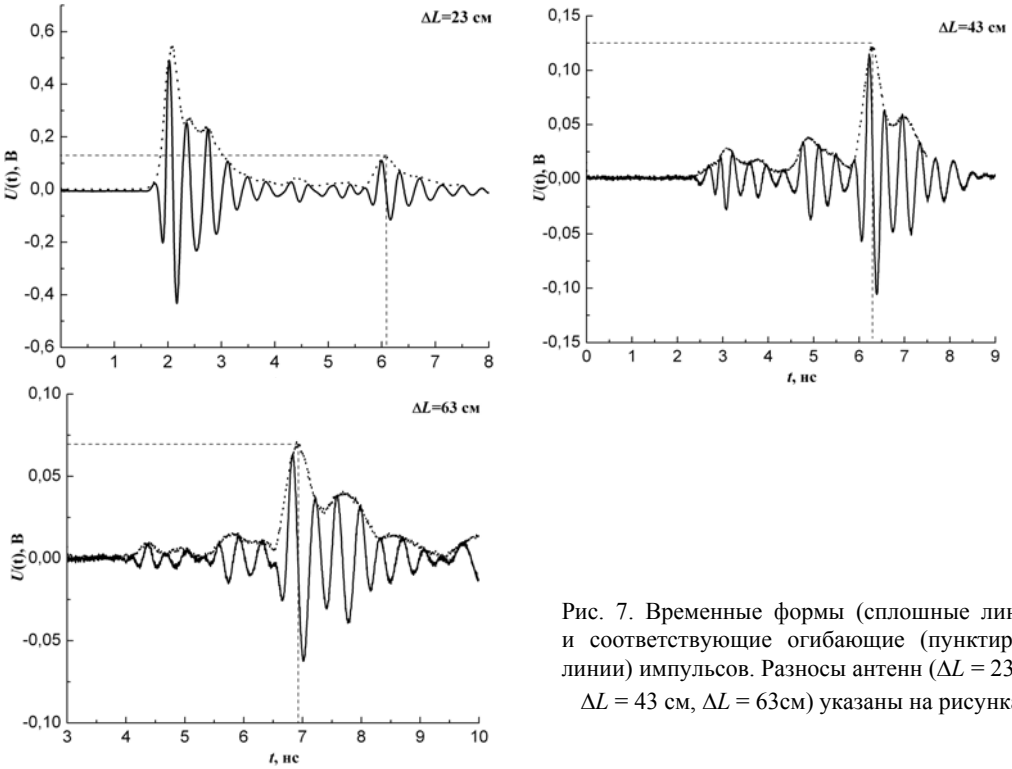


Рис. 7. Временные формы (сплошные линии) и соответствующие огибающие (пунктирные линии) импульсов. Разносы антенн (ΔL = 23 см, ΔL = 43 см, ΔL = 63см) указаны на рисунках

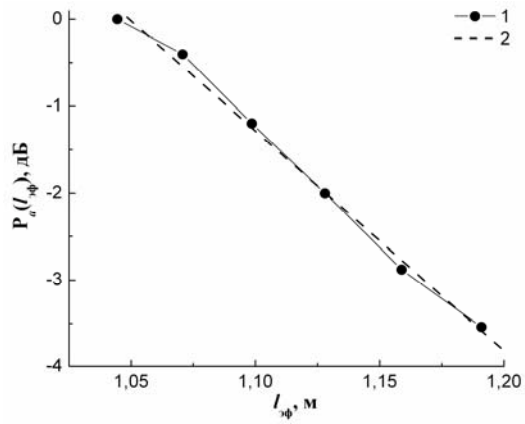


Рис. 8. Ослабление амплитуды огибающей импульса, отраженного от границы влажного песчаного слоя: 1 – измеренные данные; 2 – линии регрессии

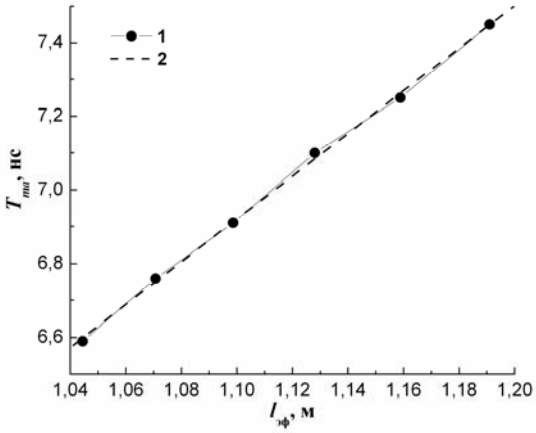


Рис. 9. Время прихода отраженного импульса: 1 – измеренные данные; 2 – линии регрессии

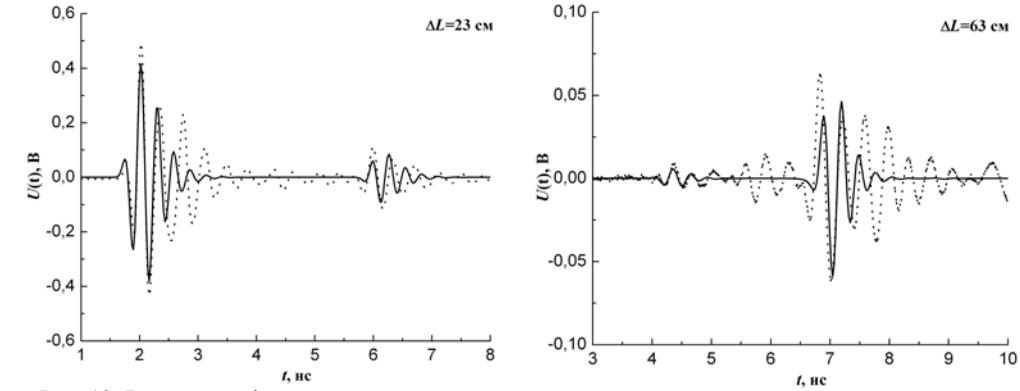


Рис. 10. Временные формы импульсов на выходе приемной антенны при разносе антенн на расстояние ΔL = 23 см, ΔL = 63 см. Сплошная и пунктирная линии соответствуют расчету и эксперименту

Коэффициент затухания амплитуды огибающей импульса, вычисленный по формуле $\Gamma_p = dP_a(l_{эф})/dl_{эф}$ с использованием (3), равен 25,3 дБ/м. Зависимость времени прихода отраженного импульса T_{ma} от эффективного расстояния $l_{эф}$ имеет линейную зависимость (рис. 9), что говорит о постоянной скорости распространения импульса (среда обладает слабой частотной дисперсией диэлектрической проницаемости). Линейная регрессия, описывающая время прихода огибающей импульса в зависимости от проходимого импульсом эффективного расстояния $l_{эф}$, имеет вид

$$T_{ma}(l_{эф}) = 5{,}40\cdot10^{-10} + 5{,}80\cdot10^{-9}l_{эф},$$
$$1{,}04 \text{ м} < l_{эф} < 1{,}19 \text{ м}. \quad (4)$$

Скорость распространения отраженного импульса в среде найдем, воспользовавшись формулой

$$V_p = \left(\frac{dT_{ma}}{dl_{эф}}\right)^{-1} \quad (5)$$

и регрессионной зависимостью (4). Эта величина составила $V_p = 1{,}72 \cdot 108$ м/с.

Теоретическое моделирование временных форм импульса. Временные формы импульсов на выходе приёмной антенны, приведенные на рис. 7, были рассчитаны на основе метода дискретных источников (МДИ) [11–13]. При расчете в МДИ была использована модель комплексной диэлектрической проницаемости модельной среды нефтегазового коллектора [5]. Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными (см. рис. 7) приведены на рис. 10.

Из данных, представленных на рис. 10, видно, что рассчитанные и измеренные форма и время прихода импульса, отраженного от верхней границы слоя песка, хорошо согласуются друг с другом. Дополнительные по отношению к расчетам осцилляции, наблюдаемые в измерениях импульсов, могут быть связаны с отражениями от дна и боковых стенок бака. В то время как при расчетах среда имела одну границу раздела.

Метод измерения расстояния до границы слоя влажного песка. Для оценок расстояния до зондируемой границы применим следующую обработку экспериментальных данных. Из геометрооптического приближения для длины трассы, проходимой отраженным импульсом (см. формулу (1)), можно записать систему уравнений

$$L_{эф,1} = \sqrt{4D^2 + \Delta L_1^2} = V_p T_{am,1},$$
$$L_{эф,i} = \sqrt{4D^2 + \Delta L_i^2} = V_p T_{am,i}, \quad (6)$$

где $T_{am,1}$, $T_{am,i}$ – время регистрации максимума огибающей импульса при разносах антенн ΔL_1 и ΔL_i соответственно. В уравнениях (6) локальная скорость распространения импульсов на различных дистанциях, согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 9, принята постоянной. Величины $T_{am,1}$, $T_{am,i}$, ΔL_1, ΔL_i известны из результатов проведенного эксперимента. В результате решения системы уравнений (6) расстояния до границы слоя влажного песка могут быть найдены по формуле

$$D_i = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\Delta L_i^2 t_1^2 - t_i^2 \Delta L_1^2}{t_i^2 - t_1^2}}, \quad (7)$$

где индекс i относится к изменяющемуся с шагом 5 см разносу антенн (i = 2 при ΔL = 0,58 м и i = 5 при ΔL = 0,73 м). Оценка расстояния до границы как среднего значения по всем измерениям составила $D_{эксп}$ = 0,46 м (рис. 11). При этом действительное расстояние до границы слоя песка было равно 0,45 ± 1 см.

Таким образом, в случае слабо диспергирующей среды, когда локальная скорость распространения импульса приближенно постоянна, можно определить расстояние до границы слоя с помощью скважинного зонда, измеряя время прихода импульса при нескольких известных расстояниях между передающей и приемной антеннами. При этом нет необходимости иметь дополнительную информацию о диэлектрической проницаемости и эффективной проводимости водонасыщенного песчаника.

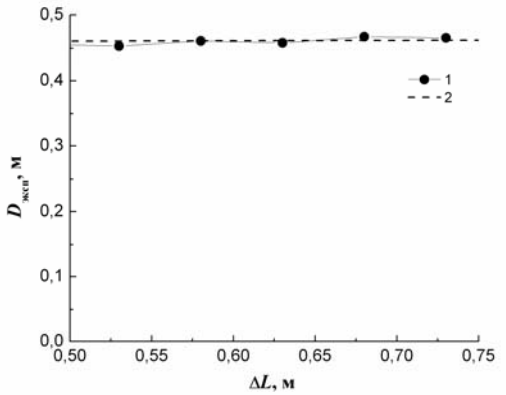


Рис. 11. Оценка расстояния до отражающей границы: 1 – вычисление по формуле (7), 2 – среднее значение

Заключение. Экспериментально подтверждена применимость теоретической модели скважинного зонда, созданной авторами с применением метода дискретных источников для прогноза временной формы и времени задержки импульса, отраженного от границ слоистой среды. Предложен способ определения расстояния до границы слоя влажного песка по значениям временной задержки отраженного импульса, измеренным для различных расстояний между передающей и приемной антеннами радара. Данный способ позволяет определять расстояние до границы слоя с относительной погрешностью 2,2 % без привлечения априорной информации об электрофизических свойствах среды в слое. Результаты данного исследования позволяют спланировать и начать стендовые испытания опытных образцов скважинных зондов.

Библиографические ссылки

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. Vol. 40, No. 9. P. 2083–2092.

2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. Vol. 37, No. 4. P. 1940–1950.

3. Epov M. I. [et al.]. A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging // Russian Geology And Geophysics. 2013. Vol. 54, No. 9. P. 1103–1107.

4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electro- magnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface // Russian Geology and Geophysics. 2009. Vol. 50, № 1. P. 46–52.

5. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011 г. С. 110.

6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation // Russian Geology and Geophysics. 2007. Vol. 48, No. 12. P. 1054–1060.

7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. Geosteering Technology of Drilling Tool in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir // Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. 2011. P.155–158.

8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas // Proceedings PIERS. (September 12–16). Suzhou, CHINA, 2011. P. 59–62.

9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool // in Proceedings IGARSS (July 25–30). Honolulu, USA, 2010. P. 3565–3567.

10. Музалевский К. В. Измерение частотных спектров комплексной диэлектрической проницаемости нефтенасыщенных горных пород с помощью скважинного зонда // Вестник СибГАУ. 2011. Т. 40, № 7. С. 127–131.

11. Эпов М. И., Кабанихин С. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Шишленин М. А. Сравнительный анализ двух методов расчета электромагнитных полей в прискважинном пространстве нефтегазовых коллекторов // Сиб. журн. индустр. матем. 2011. Т. 14, № 2. С. 132–138.

12. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Кабанихин С. И. Применение метода дискретных источников для расчёта полей СШП импульсного электромагнитного дипольного зонда в средах нефтегазового коллектора // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 9/3. С. 257–262.

13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media // *in PIERS Preceeding. 2009*. Vol. 1. P. 303–305.

14. Ebihara S., Hashimoto Y. MoM analysis of dipole antennas in crosshole borehole radar and field experiments // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. Vol. 45, No. 8. P. 2435–2450.

15. Moghaddam M. Response of a vertical magnetic dipole in cylindrically stratified media. M. S. thesis, Univ. Illinois Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1989.

References

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, vol. 40, no. 9, p. 2083–2092.

2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999, vol. 37, no. 4, p. 1940–1950.

3. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Eltsov I. N., Salomatov U. P., A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging. *Russian Geology and Geophysics.* 2013, vol. 54, no. 9, p. 1103–1107.

4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electro- magnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface. *Russian Geology and Geophysics.* 2009, vol. 50, no. 1, p. 46–52.

5. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Sverkhshirokopolosnoye elektromagnitnoye zondirovaniye neftegazovogo kollektora [Ultra-wideband electromagnetic sounding of the oil and gas reservoir]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2011, 110 p.

6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation. *Russian Geology and Geophysics.* 2007, vol. 48, no. 12, p. 1054–1060.

7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N., Geosteering Technology of Drilling Tool in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir. Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. 2011, p. 155–158.

8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas. Proceedings PIERS. 2011, September 12–16, Suzhou, CHINA. P. 59–62.

9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool. in Proceedings IGARSS. 2010, July 25–30, Honolulu, USA. P. 3565–3567.

10. Muzalevskiy K.V. [Measurement of the frequency spectra of the complex permittivity of the oil-saturated rocks using the logging tool] *Vestnik SibGAU.* 2011, , no. 7(40), p. 127–131. (In Russ.)

11. Epov M. I., Kabanikhin S. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Shishlenin M. A. [A comparative analysis of two methods for calculating electromagnetic fields in the near-well space of oil and gas collectors]. *Sib. Zh. Ind. Mat*. 2011, vol. 14, no. 2, p. 132–138. (in Russ.)

12. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Kabanikhin S. I. [Application of the method of discrete sources to calculate the pulsed electromagnetic fields UWB dipole probe in environments of oil and gas reservoir]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika.* 2010, no. 9/3, p. 257–262. (In Russ.)

13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media. *PIERS Preceeding*. 2009, Vol. 1, p. 303–305.

14. Ebihara S., Hashimoto Y. MoM analysis of dipole antennas in crosshole borehole radar and field experiments. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007, vol. 45, no. 8, p. 2435–2450.

15. Moghaddam M. Response of a vertical magnetic dipole in cylindrically stratified media. M.S. thesis, Univ. Illinois Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1989.

© Музалевский К. В., Миронов В. Л., 2014

УДК 631.1

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 217–223

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ЗОНДИРОВАНИЯ ГРАНИЦ НЕФТЕНАСЫЩЕННОГО ПЛАСТА ШИРОКОПОЛОСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЗОНДОМ

К. В. Музалевский, В. Л. Миронов, М. И. Михайлов

Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, Академгородок, 50/38
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

На крупномасштабном радарном стенде ИФ СО РАН проведены эксперименты по зондированию модельной нефтенасыщенной среды лабораторным макетом импульсного электромагнитного зонда, который располагался в цилиндрической оболочке промышленно выпускаемой скважинной каротажной аппаратуры ВИКИЗ. На основе измерения временных форм импульсных сигналов на выходе приемной антенны в зависимости от расстояния между передающей и приемной антеннами найдена скорость распространения и затухание зондирующих импульсов. Экспериментально обоснована возможность регистрации зондирующих импульсов, проходящих в толще модельной нефтенасыщенной среды расстояние до 2,65 м. При этом был достигнут динамический диапазон приемопередатчика зонда 128,3 дБ, что позволяет обнаружить границу модельного нефтенасыщенного пласта на расстояниях до 1,3 м. Кроме того, показано, что временные формы зондирующих импульсов, измеренные на выходе приемной антенны зонда, с высокой точностью описываются теоретической моделью.

Ключевые слова: нефтегазовый коллектор, скважинный радар, сверхширокополосные импульсы.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 217–223

POTENTIAL OF DETECTION RANGE OF BORDERS OF OIL RESERVOIR USING LOGGING TOOL WITH BROADBAND ELECTROMAGNETIC PULSE

K. V. Muzalevskiy, V. L. Mironov, M. I. Mikhailov

The Institute of Physics of the Academy of Sciences
50, bld. 38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

On large-scale radar stand at the IF SB RAS, the experiments on sensing of oil-saturated sand using the laboratory pulsed electromagnetic logging tool, which was placed in a cylindrical shell of a commercially available borehole logging tool (VIKIZ), were conducted. For this purpose a big wood box (1.5м × 3.2м × 2.7м) filled moist sand moisturized with brine was built. The box was located in a laboratory room on a concrete screed. Borehole radar antennas are resistively loaded dipole antenna with extended bandwidth. The transmitting antenna was connected to the hi-voltage (~3kV) generator, the receiving antenna to the stroboscopic oscilloscope. With variation of the distance between the transmitting and receiving antennas the signals of receiving pulses were recorded. On the basis of measurements of the pulse shapes at the output of the receiving antenna, depending on the distance between the transmitting and receiving antennas were found propagation velocity and attenuation of sensing pulses. Experimentally was proved the possibility of recording probe pulses, that propagates in the oil-saturated sand at the distance up to 2.65 m. At given dynamic range of the logging tool transceiver (128.3 dB), the boundary of the oil-saturated sand can be detected at the distances up to 1.3 m. Furthermore it is shown that temporary forms of sensing pulses measured at the output of the receiving antenna of the logging tool are described theoretical model with high accuracy. The results of this study allow you to plan and start bench testing of prototypes borehole probes.

Keywords: oil and gas reservoir, borehole radar, UWB pulses.

Введение. В последнее время развиваются методы электромагнитного импульсного каротажа из скважины пластов нефтегазового коллектора [1–5]. В работах [5–11] теоретически изучены принципиальные возможности использования сверхширокополосного электромагнитного импульсного зонда (СЭМИЗ) для геонавигации бурового инструмента относительно водонефтяного контакта (ВНК) водоплавающей нефтяной залежи при бурении горизонтальных скважин. Однако экспериментальное обоснование каротажа нефтенасыщенной среды нефтегазового коллектора с использованием предложенной в работе [3; 7; 12; 13]

конструкции зонда в условиях масштабов зондируемой среды, близких к натурным, не проводилось. В данной работе с целью обоснования принципиальной возможности обнаружения границы ВНК нефтенасыщенного пласта и оценки необходимого динамического диапазона приемопередатчика скважинного зонда проведены эксперименты по зондированию модельной нефтенасыщенной среды лабораторным макетом СЭМИЗ. Условия крупномасштабного радарного стенда Института физики (ИФ) СО РАН позволили сформировать модельный нефтенасыщенный слой толщиной ~1 м, близкий к наблюдаемым в реальных условиях нефтегазового коллектора. При этом макет СЭМИЗ был помещен в специальную цилиндрическую оболочку промышленно выпускаемой скважинной аппаратуры ВИКИЗ. Петрофизические параметры нефтенасыщенной среды были выбраны близкими к характеристикам песчанистых нефтегазовых коллекторов Сибири. При моделировании скважинного зонда выбрана более реалистичная электродинамическая модель, которая учитывает влияние диэлектрического корпуса зонда, геометрию экспериментальной установки и конструкцию антенн СЭМИЗ.

Описание экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Деревянный бак размером (1,5 м × 3,2 м × 2,7 м) заполнялся влажным песком в виде треугольной призмы с высотой треугольного основания 1,1 м. Бак не имел деревянного основания и размещался непосредственно на полу лабораторного помещения. Были проведены исследования строения среды под полом лабораторного помещения (рис. 1).

Пол лабораторного помещения представляет собой бетонную стяжку толщиной 80 мм, под бетонным полом расположен слой песчано-гравийной смеси (ПГС) толщиной 140 мм, слой ПГС лежит на полупространстве, состоящем из суглинка (объёмная влажность 13,5 %). Каркас бака изготовлен из бруса и обшит половой доской толщиной 28 мм. Внутри бак был покрыт полиэтиленовой пленкой, герметично запаянной сверху. В баке размещалась стеклотекстолитовая труба с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4{,}6$, длиной 3,5 м, с внешним и внутренним диаметром 11 и 6,5 см соответственно. Данная стеклопластиковая труба используется в качестве оболочки в аппаратуре ВИКИЗ и была предоставлена нам для эксперимента компанией ОАО «НПО «Луч», г. Новосибирск. Труба закреплена на торцевых сторонах бака (3240 мм × × 1540 мм) на расстоянии 17,8 см от дна бака. Пространство бака заполнялось влажным песком, сформированным в виде треугольной призмы (рис. 1). Вся конструкция находилась в помещении с температурой 22 °С.

Приёмопередатчик макета СЭМИЗ состоял из генератора импульсов, двух дипольных антенн и цифрового стробоскопического осциллографа. Дипольные антенны передатчика T и приемника R, разнесённые на расстояние L друг от друга, находились внутри стеклотекстолитовой трубы. Передающая антенна возбуждалась генератором высоковольтных импульсов напряжения ГИН–2–02 производства ЗАО «ФИД-Технология», г. Санкт-Петербург. Длительность импульсов на уровне половины амплитуды составляла 0,8 нс, частота повторения импульсов 10 кГц, выходное сопротивление генератора 50 Ом по постоянному току. Стробоскопический осциллограф (фирма «Трим», TMR8120M) позволил проводить измерения напряжения и формы импульсов в полосе частот 0–20 ГГц при уровне шума 3 мВ. Временная форма импульса и его нормированный спектр на выходе генератора ГИН–2–02, измеренные с помощью стробоскопического осциллографа, приведены на рис. 2.

Частота спектра импульса напряжения на выходе генератора в точке максимума равна 0,214 ГГц, а ширина спектра Δf по уровню 0,5 составляет $\Delta f_{0,5} = f_{\max} - f_{\min} = 0{,}558$ ГГц ($f_{\max} = 0{,}558$, $f_{\min} = 0{,}0$). Коэффициент широкополосности импульса на выходе генератора, определенный по формуле $\Delta F = 2(f_{\max} - f_{\min})/(f_{\max} + f_{\min})$, равен 2. Данный импульс является широкополосным ($\Delta F > 1$). Отношение ширины спектра импульса к его центральной частоте равно 2,6 и близко к коэффициенту широкополосности.

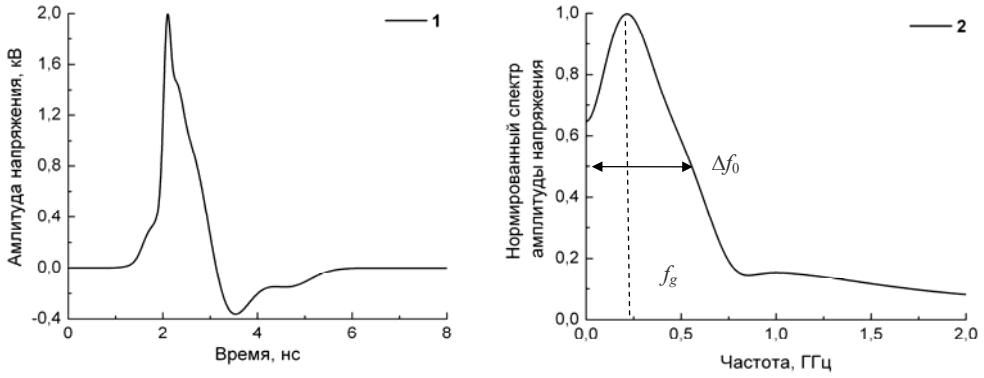
Антенны скважинного радара представляют собой диполь с расширенной полосой пропускания [14]. Плечи диполя имеют цилиндрическую форму с конической центральной частью. Длина диполя 135 мм. Для уменьшения влияния токов, наводимых на внешней поверхности трубки, в которой размещен коаксиальный кабель, применены запирающие стаканы в виде короткозамкнутых отрезков коаксиальных линий длиной 125 мм с волновым сопротивлением 95 Ом, расположенных на расстоянии 30 мм друг от друга и от торца диполя. Внешний диаметр передающей и приёмной антенны равен 64,5 мм, длина с учетом трех запирающих стаканов составляет 620 мм. Внешний вид передающей/приёмной антенны изображен на рис. 3.

Спектры комплексной диэлектрической модельной нефтенасыщенной среды. Для эксперимента была подготовлена модельная среда, соответствующая петрофизическим характеристикам нефтенасыщенного слоя песчанистых нефтегазовых коллекторов Сибири. Модельная среда представляла собой смесь песка, увлаженного водопроводной водой с растворенной поваренной солью. При этом объёмная влажность песчаника составляла 5,7 %, соленость солевого раствора задавалась 17 г/л. Спектры комплексной диэлектрической проницаемости модельной среды были измерены коаксиально волновым методом в диапазоне частот от 0,04 до 15 ГГц на диэлькометрической установке с использованием коаксиальных ячеек и векторного анализатора цепей ZVK фирмы Rohde-Schwarz. Методика измерений подробно изложена в работе [15]. Измеренные спектры действительной Re(ε) и мнимой Im(ε) частей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) ε модельной среды изображены на рис. 4. Теоретическая интерпретация спектров КДП среды была проведена на основе рефракционной диэлектрической модели [15]. Согласно [15] показатель преломления n и нормированный коэффициент затухания κ смеси, состоящей из сухого песка и воды, можно представить в форме рефракционной диэлектрической модели:

$$n = n_{\mathrm{d}} + (n_{\mathrm{w}} - 1)W_w, \quad (1)$$

$$\kappa = \kappa_d + \kappa_w W_w. \quad (2)$$

Рис. 1. Схема крупномасштабного лабораторного радарного стенда (все размеры даны в мм)



а *б*

Рис. 2. Импульс напряжения (*а*) и спектр (*б*) выходного сигнала генератора

Рис. 3. Фотография антенны

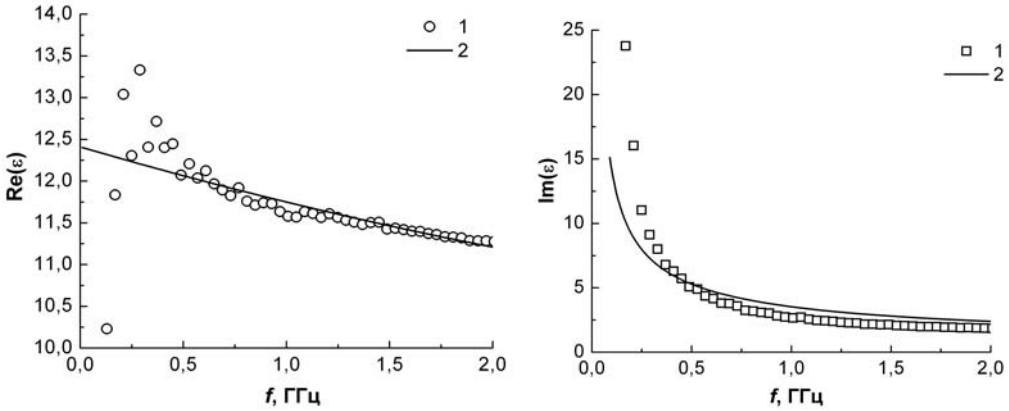


Рис. 4. Спектры действительной Re(ε) и мнимой Im(ε) частей комплексной диэлектрической проницаемости ε смеси песка и водного раствора поваренной соли: 1 – экспериментальные данные; 2 – рефракционная модель

Индексы s, d, w относятся к влажному образцу, сухому образцу и водному раствору соответственно. Коэффициент преломления n и нормированный коэффициент затухания κ связаны с действительной $\varepsilon' = \mathrm{Re}\,\varepsilon$ и мнимой $\varepsilon'' = \mathrm{Re}\,\varepsilon$ частями КДП $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$, где i – мнимая единица, формулами

$$n = \sqrt{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \varepsilon'^2} / \sqrt{2}\,, \qquad (3)$$

$$\kappa = \sqrt{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon'^2} / \sqrt{2}\,. \qquad (4)$$

КДП водного солевого раствора описывалась в виде формулы Дебая:

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{w,\infty} + \frac{\varepsilon_{w,s} - \varepsilon_{w,\infty}}{1 - i2\pi f \tau_w} + i\frac{\sigma_w}{\omega\varepsilon_0}. \qquad (5)$$

В выражении (5) величина f обозначает частоту электромагнитного поля, величины σ_w, τ_w, $\varepsilon_{w,s}$ и $\varepsilon_{w,\infty}$ обозначают омическую проводимость, время релаксации, низкочастотный и высокочастотный пределы относительной диэлектрической проницаемости. Величина ε_0 обозначает диэлектрическую проницаемость вакуума, которая равна $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. На основе формул (1)–(5) была проведена нелинейная аппроксимация экспериментальных спектров, изображенных на рис. 4, в случае следующих свободных параметров: n_d, κ_d, $\varepsilon_{w,\infty}$, $\varepsilon_{w,s}$, σ_w, τ_w. Соответствующие параметры, стремящие к минимуму, среднеквадратичное отклонение экспериментальных спектров от рассчитанных теоретически составили значения: n_d = 2,89, κ_d = 0,15, $\varepsilon_{w,\infty}$ = 4,9, $\varepsilon_{w,s}$ = 73,6, σ_w = 0,02 см/м, $\tau_w = 8{,}7 \cdot 10^{-12}$ с. С использованием найденных параметров и формул (1)–(5) построены теоретические спектры КДП среды (рис. 4, кривая 2).

Характеристики импульса, излучаемого в среду. На рис. 5 и 6 представлены временная форма и спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны СЭМИЗ при расположении антенн на расстоянии 0,5 м друг от друга. Этот импульс содержит, кроме прямой волны, распространяющейся из излучающей антенны в приемную, также и волны, отраженные от дна, стенок, торцов бака и границ «воздух–песок» (боковая грань призмы, см. рис. 1). Так как амплитуды отраженных импульсов много меньше амплитуды импульса прямой волны, то импульс, изображенный на рис. 5, можно приближенно принять за импульс, распространяющийся в пространстве около трубы. Спектр этого импульса показан на рис. 6.

Искажение временной формы этого импульса, по сравнению с импульсом на выходе генератора (см. рис. 2), вызвано тем, что ширина амплитудно-частотной характеристики приемопередающего тракта СЭМИЗ уже, чем ширина спектра импульса, подаваемого на вход передающей антенны. В результате фильтрации ширина спектра импульса на выходе приемной антенны уменьшилась, а его длительность, соответственно, увеличилась. На рис. 5 показана также огибающая импульса, которая была рассчитана как модуль амплитуды комплексного аналитического сигнала, рассчитанного для данного импульса. Длительность излученного в среду импульса (по уровню 0,5 от максимума огибающей импульса) равна 5,6 нс. Параметры частотного спектра импульса, излучаемого в среду, оказались следующие: частота спектра в точке максимума равна $f_\text{р}$ = 0,363 ГГц, ширина спектра $\Delta f_{0,5}$ = 0,151 ГГц, коэффициент широкополосности ΔF = 0,4. Излучаемый в среду импульс является относительно узкополосным ($\Delta F < 1$). Рассмотрим далее процесс отражения зондирующего импульса от боковых границ (песок–воздух) треугольной призмы.

На рис. 7 представлены результаты измерения напряжения на приемной антенне для двух расстояний между передающей и приёмной антеннами в случае, когда на боковые грани призмы (см. рис. 1) были положены металлические листы. Импульс (a) на рис. 7 сформирован волной, распространяющейся вдоль оси СЭМИЗ, импульс (b) сформирован суммой двух волн, отраженных от двух боковых граней призмы, которые, когерентно складываясь, создают эффект усиления сигнала, импульс (c) сформирован волнами, отраженными от торцевых стенок бака.

На основе измеренных временных форм импульсов, подобных показанным на рис. 7, были определены временные задержи и относительное затухание амплитуды импульсов, отраженных от боковых граней призмы (импульс, обозначенный индексом (b) на рис. 7), при различном разносе передающей и приемной антенн. В результате этого были рассчитаны скорость распространения V_p = 0,07 м/нс и коэффициент удельного затухания Γ_p = 44,9 дБ/м зондирующего импульса, распространяющегося в среде призмы.

На основе измеренных спектров КДП среды, приведенных на рис. 4, была оценена групповая скорость и коэффициент затухания волнового пакета на средней частоте зондирующего импульса 0,36 ГГц (см. рис. 6). Значение удельного коэффициента затухания и групповой скорости импульса оказались равными Γ_f = 48,4 дБ/м и V_g = 0,09 м/нс соответственно. Из сравнения измеренных с помощью скважинного зонда и рассчитанных величин (Γ_p и Γ_f и V_p и V_g) следует, что подобным образом рассчитанные удельный коэффициент затухания и скорость распространения импульса с погрешностью 7 и 22 % соответственно отклоняются от экспериментально измеренных. Следовательно, данный подход может быть использован для определения эффективного коэффициента поглощения и показателя преломления на средней частоте зондирующего импульса.

Глубина зондирования (при которой амплитуда принятого импульса равна уровню собственных шумов осциллографа) в данном эксперименте составила 0,97 м (при расстоянии между передающей и приёмной антеннами 1,8 м). Используя геометрооптическое приближение $l_\text{эф} = \sqrt{4d^2 + L^2}$ для оценка длины трассы распространения отраженного импульса, получим $l_\text{эф}$ = 2,65 м. С учетом измеренной величины удельного коэффициента затухания амплитуды зондирующего импульса Γ_f находим, что динамический диапазон системы был не хуже чем 128,3 дБ. Исходя из достигнутого динамического диапазона лабораторного макета скважинного зонда и найденного удельного

коэффициента затухания Γ_f, при размещении приемной и передающей антенны на расстоянии 0,27 м (расстояние между фазовыми центрами диполей) предельная дальность зондирования нефтенасыщенного слоя может составить 1,32 м.

Теоретическое моделирование скважинного зонда. Для корректного теоретического моделирования макета сверхширокополосного каротажного зонда, с учётом конструкции антенн, оболочки зонда и конечных размеров бака радарного стенда, была использована программа численного трёхмерного расчета электромагнитных полей (Microwave Studio) и диэлектрическая модель (1)–(5), которая учитывает петрофизические характеристики среды в объеме трехгранной призмы. Теоретически рассчитанные временные формы импульсов напряжения на выходе приёмной антенны СЭМИЗ в сравнении с экспериментальными данными показаны на рис. 8.

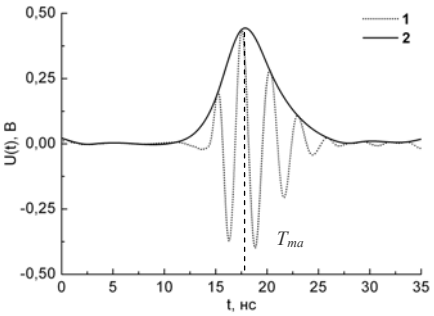


Рис. 5. Импульс напряжения на выходе приемной антенны (1) и его огибающая (2)

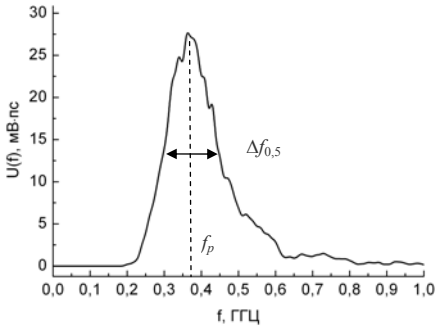


Рис. 6. Спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны

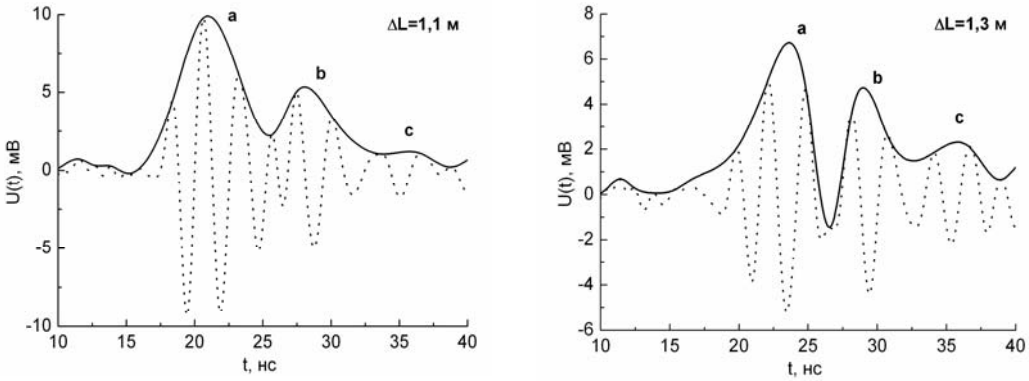


Рис. 7. Временные формы импульсов (пунктирная линия) и соответствующие огибающие (сплошная линия) на выходе приемной антенны при различном расстоянии между передающей и приёмной антеннами

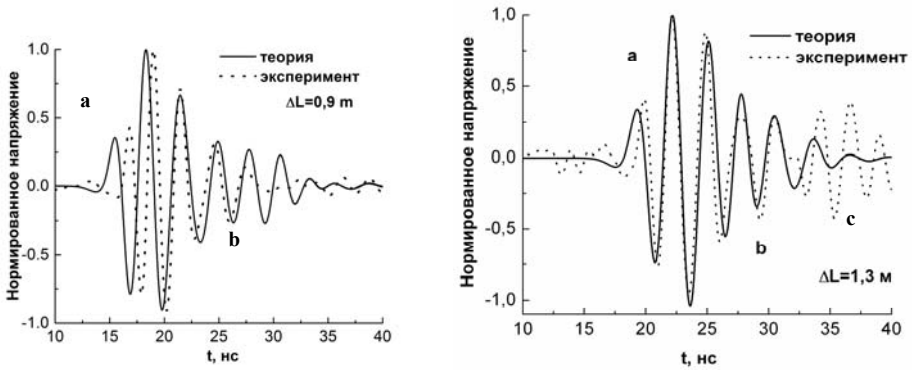


Рис. 8. Нормированные временные формы импульсов на выходе приемной антенны при разносе антенн на расстояние ΔL = 0,9 и ΔL = 1,3 м, D = 0,97 м. Сплошная и пунктирная линии соответствуют расчету и эксперименту (в случае отсутствия металлического отражателя на верхних гранях призмы)

Рассчитанная и измеренная форма импульсов прямого (a) и отраженного от боковой грани призмы (b) сигнала хорошо согласуются друг с другом. Однако при теоретическом моделировании не удалось корректно описать импульс (c), связанный с отражением волны от торцевой стенки бака.

Заключение. Полученные с использованием крупномасштабного радарного стенда результаты демонстрируют согласие измеренных и рассчитанных с помощью предложенной в проекте модели нефтенасыщенной среды и модели каротажного зонда. Удовлетворительное соответствие теоретического моделирования форм и временных задержек импульсов с экспериментальными данными, полученными на крупномасштабном радарном стенде, позволяют проводить теоретическое моделирование опытных образцов скважинных радаров в средах нефтегазового коллектора, спланировать и начать их стендовые испытания. Кроме того, экспериментально доказана принципиальная возможность регистрации зондирующего сигнала, отраженного от границы модельного нефтенасыщенного пласта толщиной до 1,3 м, при динамическом диапазоне приемопередатчика зонда 128,3 дБ. Достигнутая дальность зондирования на 30 % превосходит предельную дальность зондирования имеющихся аналогов (аппаратура ВИКИЗ).

Библиографические ссылки

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. Vol. 40, No. 9. P. 2083–2092.

2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. Vol. 37, No. 4. P. 1940–1950.

3. Epov M. I. [et al.]. A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging // Russian Geology And Geophysics. 2013. Vol. 54, No. 9. P. 1103–1107.

4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electro- magnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface // Russian Geology and Geophysics. 2009. Vol. 50, № 1. P. 46–52.

5. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011 г. С. 110

6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation // Russian Geology and Geophysics. 2007. Vol. 48, No. 12. P. 1054–1060.

7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. Geosteering Technology of Drilling Tool. in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir // Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. 2011. P. 155–158.

8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool. to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas // Proceedings PIERS (September 12–16). Suzhou, CHINA. 2011. P. 59–62.

9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool // in Proceedings IGARSS (2010, July 25–30). Honolulu, USA. P. 3565–3567.

10. Музалевский К. В. Измерение частотных спектров комплексной диэлектрической проницаемости нефтенасыщенных горных пород с помощью скважинного зонда // Вестник СибГАУ. 2011. Т. 40, № 7. С. 127–131.

11. Эпов М. И., Кабанихин С. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Шишленин М. А. Сравнительный анализ двух методов расчета электромагнитных полей в прискважинном пространстве нефтегазовых коллекторов // Сиб. журн. индустр. матем. 2011. Т. 14, № 2. С. 132–138.

12. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Кабанихин С. И. Применение метода дискретных источников для расчёта полей СШП импульсного электромагнитного дипольного зонда в средах нефтегазового коллектора // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 9/3. С. 257–262.

13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media // in PIERS Preceeding. 2009. Vol. 1. P. 303–305.

14. Балзовский Е. В. Буянов Ю. И., Кошелев В. И. Сверхширокополосная дипольная антенна с резистивными плечами : научное издание // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 4. С. 460–465.

15. Эпов М. И. [и др.]. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0,05–16 ГГц // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 5. С. 613–618.

References

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 2002, vol. 40, no. 9, p. 2083–2092.

2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999, vol. 37, no. 4, p. 1940–1950.

3. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Eltsov I. N., Salomatov U. P., A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging. *Russian Geology and Geophysics.* 2013, vol. 54, no. 9, p. 1103–1107.

4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electro- magnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface. *Russian Geology and Geophysics.* 2009, Vol. 50, no. 1, p. 46–52.

5. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. *Sverkhshirokopolosnoye elektromagnitnoye zondirovaniye neftegazovogo kollektora* [Ultra-wideband electromagnetic sounding of the oil and gas reservoir]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2011, 110 p.

6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation. *Russian Geology and Geophysics.* 2007, vol. 48, no. 12, p. 1054–1060.

7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N., Geosteering Technology of Drilling Tool

in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir. Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. 2011, p. 155–158.

8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas. Proceedings PIERS. 2011, September 12-16, Suzhou, CHINA. P. 59–62.

9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool. in Proceedings IGARSS. 2010, July 25-30, Honolulu, USA. P. 3565–3567.

10. Muzalevskiy K.V. [Measurement of the frequency spectra of the complex permittivity of the oil-saturated rocks using the logging tool] *Vestnik SibGAU*. 2011, vol. 40, no. 7, p. 127–131. (In Russ.)

11. Epov M. I., Kabanikhin S. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Shishlenin M. A. [A comparative analysis of two methods for calculating electromagnetic fields in the near-well space of oil and gas collectors]. *Sib. Zh. Ind. Mat*. 2011, vol. 14, no. 2, p. 132–138. (In Russ.)

12. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Kabanikhin S. I. [Application of the method of discrete sources to calculate the pulsed electromagnetic fields UWB dipole probe in environments of oil and gas reservoir]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika.* 2010, no. 9/3, p. 257–262. (In Russ.)

13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media. *PIERS Preceeding*. 2009, Vol. 1, p. 303–305.

14. Balzovskiy Ye. V., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. [UWB dipole antenna with resistive shoulders scientific publication]. *Radiotekhnika i elektronika.* 2004, vol. 49, no. 4, p. 460–465. (In Russ.)

15. Epov M. I., Bobrov P. P., Mironov V. L., Repin A. V. Dielectric relaxation in oil-bearing clayey rocks. *Russian Geology and Geophysics.* 2011, Vol. 52, no. 9, p. 1028–1034.

© Музалевский К. В., Миронов В. Л.,
Михайлов М. И., 2014

УДК 621.791.72

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 224–230

WELD FORMATION CONTROL AT ELECTRON BEAM WELDING WITH BEAM OSCILLATIONS

D. N. Trushnikov[1], E. Koleva[2, 3], G. Mladenov[2, 3], A. V. Shcherbakov[4]

[1]Perm National Research Polytechnic University
29, Komsomolsky Av., Perm, 614990, Russian Federation
[2]Institute of Electronics Bulgarian Academy of Sciences
72, Tzarigradsko Chaussee, Sofia 1786, Bulgaria
[3]Technology Center of Electron Beam and Plasma Technologies
68–70, Vrania ul., ap. 10, Sofia, 309, Bulgaria
[4]National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
14, Krasnokazarmennaya str., E-250, Moscow, 111250, Russian Federation
E-mail: trdimitr@yandex.ru

Electron beam welding is used extensively to produce essential machine parts. The control of the basic beam parameters – beam power or beam current at constant accelerating voltage, welding speed, current of focusing lens and distance between electron gun and welded sample surface – is not enough to obtain at most of the regimes sound welds. Control of the focus position using analysis of the high frequency component of the current, collected by plasma, at periodic interactions on the beam (the oscillation of the beam or modulation of the focusing current) could be a way for the formation of non-defect welds at these conditions. The statistical analysis of weld geometry is shown.

Keywords: Electron beam welding, penetration control, focus control, beam oscillation, focus scanning.

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 224–230

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ СВАРНОГО ШВА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ С ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ПУЧКА

Д. Н. Трушников[1], Е. Колева[2, 3], Г. Младенов[2, 3], А. В. Щербаков[4]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29
[2]Институт электроники Болгарской академии наук
Болгария, 1786, г. София, Цареградское шоссе, 72
[3]Технологический центр электронно-лучевых и плазменных технологий
Болгария, 1309, г. София, ул. Враниа, 68-70, кв. 10
[4]Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Федерация, 111250, г. Москва, Е-250, ул. Красноказарменная, 14
E-mail: trdimitr@yandex.ru

Электронно-лучевая сварка широко используется для производства ответственных изделий. Только контроля основных параметров пучка – мощности пучка или тока пучка при постоянном ускоряющем напряжении, скорости сварки, тока фокусирующей линзы и расстояния между электронной пушкой и поверхностью образца – не достаточно, чтобы получить качественные швы на большинстве режимов. Контроль положения фокуса, использующий анализ высокочастотной составляющей тока, собранного из плазмы, при периодических взаимодействиях на пучок (колебания пучка или модуляции тока фокусировки) может быть способом для формирования бездефектных сварных швов на этих условиях. Приведены результаты статистического анализа геометрии сварных швов.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, управление проплавлением, контроль фокусировки, осцилляция луча, сканирование фокуса.

Introduction. Electron beam welding (EBW) is a fusion welding process performed in a vacuum. The process has a number of advantages: high power concentration in the electron beam, easy control of the beam energy flow, deeply penetrating beam producing narrow and deep welds, smaller heat-affected zones, equal strengths of the

weld joint and the main metal, etc. These advantages allow the use of the electron beam for welding of reactive and non-ferrous metals, high-tensile and heat-resistant alloys that are typically used in the production of critical products.

However, certain problems arise in the EBW process, which are related to the instability of weld-joint formation and the difficulties in controlling the optimal focus regime. The complex character and the lack of understanding of the processes during EBW make numerical modelling difficult, forcing scientists to rely on experimental research methods.

The basic parameters of EBW are accelerating voltage, electron beam current, focusing-coil current, welding speed, operating gun-sample distance, vacuum level in the process chamber, etc. These parameters are chosen according to factors such as the operator's own experience, mathematical models [1; 2], or statistical analysis [3; 4]. The most difficult parameter to identify and reproduce during EBW is the beam focusing position. The operator of an EBW machine needs manually to set the focus of the beam. The adjustment of the focusing-coil current is based on the operator's subjective evaluation of luminosity brightness, emitted from the interaction area of the beam irradiating refractory target material, e.g. wolfram. When the luminosity brightness becomes maximal, the focusing mode is considered sharp [5]. The process of manual focus control is subjective and can lead to performance depreciation. Each operator interprets the luminosity brightness of the operational area differently and, therefore, the welding results may not be reproducible. Changing the focusing current by 1 % may cause a 20–60 % fluctuation of fusion depth. The focusing position also significantly influences the probability of various defects specific to EBW, such as spiking, cavitations, medial cracks, etc.

The need for real-time focusing control results from changes in the electronic–optical systems of an electronic gun due to cathode wear and tear or after planned maintenance. For welding operation modes, the focusing current should be adjusted based on experiments with various materials, thicknesses and types of electronic-beam guns. Real-time adjustments are important for welding large objects, especially when the cathode electron emission and thus the adjustments of the gun are significant.

Therefore, the control, monitoring and analysis of the processes in the keyhole in the welding bath during EBW requires analysis of the secondary signal parameters, such as secondary electron or ion emission, optical emission, X-rays, etc.

All the above methods use extreme correlations between the secondary emissions and the focusing lens current. These correlations are characterised by the dead zones and two values of the focusing lens current that ensure similar signal parameters, but various derivatives.

One of the specific processes caused by the impact of the intensive electron beam on the metal during EBW is the formation of plasma in the operational area [6; 7]. The parameters of the plasma are closely connected with the electron beam thermal effect on the metal being welded. In [8; 9], the plasma current parameters are suggested for electron beam focusing control.

A possibility to change from free to forced instabilities of the keyhole walls is to apply beam linear longitudinal oscillation.

The application of focal spot scanning (modulation of the focusing lens current) is another method for control of the keyhole wall instabilities. The low frequency scanning of the focusing current has negative effects on the quality of the weld. Application of high frequency scanning of the focal spot to improve the quality of the welded joint is known. However, its applicability to the operational control of the beam focusing has not been investigated until now.

A simultaneous recording of the deflection coil current or the focusing lens current and the secondary current signals collected by the plasma was realised using both approaches in order to affect the beam energy deposition processes in keyhole.

This article studies the behaviour of the current collected from the plasma, generated in the operational area of the electron beam, when using EBW with oscillating beam or with focal spot scanning (modulation of the focusing lens current), based on the coherent accumulation method [10–12]. This method can be used to obtain not only amplitude ratios, but also the phase ones, as well as determining how the current signals collected by the plasma are synchronised with the deflection current or the focusing lens signals during EBW. These results on the probability of the generation of the high frequency component of the non-independent gas discharge current (namely the instabilities of electron emission from the super-heated spots on keyhole walls) can be useful as methods to control the EBW focus position against the parameters of the plasma current.

Experimental procedure. A ring electrode collector was used to measure the secondary current from the plasma. The collector was located over the welding zone. The collector has a positive potential of 50 V. The loading resistance was 50 Ω. The signal from the collector was registered by a data acquisition system and further processed by a computer. The sampling frequency in the experiments was in a range from 100 kHz to 1 MHz per channel.

During the experiments, samples of chrome-molybdenum steel (0.15 % carbon, 5 % chrome and around 1 % of molybdenum) were welded. The accelerating voltage in all experiments was 60 kV. The welding power was 3 kW and the welding speed was 5 mm/s for experiments of beam oscillations and the welding power was in the range of 2 kW to 4 kW in the case of focusing spot scanning.

During the experiments, the welding power P, welding speed, focus degree ΔI_f ($\Delta I_f = I_f - I_{f0}$ is the difference between the average focusing lens current of the welding mode and the focusing lens current of the sharp focus), the frequency f and the amplitude of the focal spot scanning A were varied.

The current in the focusing or deflection lenses was changed under a linear law. In the case of beam deflection oscillations experiments, the deflection oscillation frequency ranged between 50 Hz and 1.400 Hz and the range of the duplicated maximal amplitude of the beam deflection oscillation was 0.4 mm to 3.5 mm.

In the case of beam focus scanning, the limits of the scanning frequency were from 90 to 12,000 Hz. The amplitude of these oscillations was in the range of 3 to 25 mA.

Transverse metallurgical sections of the weld were made from all the welded samples. The focus regime was determined by the transverse sizes of the penetration depth. The sharp focus regime corresponds to the maximum penetration depth.

Measured results. Fig. 1 shows the spectrum of the secondary current signal, generated from the plasma plume over the work-piece from studied chrome-molybdenum steel at EBW with the electron beam oscillations.

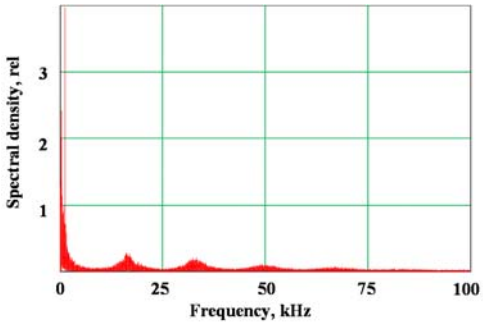


Fig. 1. Spectrum of secondary current signal, extracted from plasma at EBW with the oscillation of electron beam: electron beam power P = 2.5 kW, lens focusing current at position of 'sharp focus' (I_f = 840 mA), oscillation frequency f = 561 Hz, sweep size of the duplicated amplitude of deflection oscillations 2A = 0.9 mm

The main part of the signal oscillations is in the low frequency range up to 5 kHz. Apart from that, a peak of oscillations of the plasma signal is observable at the frequency of 15–20 kHz and its multiple harmonics, which characterises high frequency processes in the system electron beam-penetration channel-plasma.

Fig. 2 shows a typical spectrum of the secondary current signal collected from plasma during the welding of steel samples. It can be noted that there is the same characteristic maximum in the signal at frequencies close to 15–20 kHz. The collected from the plasma signal record (fig. 3) looks like a series of high frequency impulses that follow each other (curve 1). For comparison, the record of deflection oscillations current (curve 2) is shown. The impulses of the series of the secondary signal appear with frequency of order 10–30 kHz and have considerable values (impulses value depends on the current selection conditions and reached 1 A in the performed experiments).

The similarity of these records of the high frequency current signals, collected by the plasma at periodic interaction on beam energy absorption in the keyhole in the welding bath, can be seen. There is a hypothesis to explain the mechanism of the appearance of high frequency oscillations in the collected current by the positive electrode in the plasma. The collector plays the role of an anode in a non-independent discharge. The plasma in the keyhole and the plasma plume over the interaction zone is an electrically conductive media in that discharge. The electron emission occurs from over-heated spots on the walls or in the bottom part of the keyhole. These spots are explained with the assumption of the existence of electron beam ablation (explosive boiling) [13–15]. The rate of the energy input in the interaction zone of the electron beam with the metal in the keyhole is much higher than the rate of heat removal through conduction. There is local over-heating of the metal, followed by explosive boiling. The boiling metal vapour affects the beam structure, the local beam part is scattered by the metal vapour and by the blow-up ablation products, and the power density is dramatically reduced. After the vapour evacuation from the keyhole, the beam power density is again above the critical and the process resumes. The frequencies predicted by this hypothesis are close to the high frequency component, observed experimentally (fig. 1 and fig. 2). The local over-heating of the metal walls of the keyhole is a result of the local areas with lower angle in respect to near to vertical walls of the front side of the keyhole in the welding bath. Some blow-up droplets also absorb additional energy and are for a short time over-heated. As a result the thermal electron emission from over-heated spots plays the role of an impulse cathode emitter in non-independent gas discharge with an anode – the collector electrode.

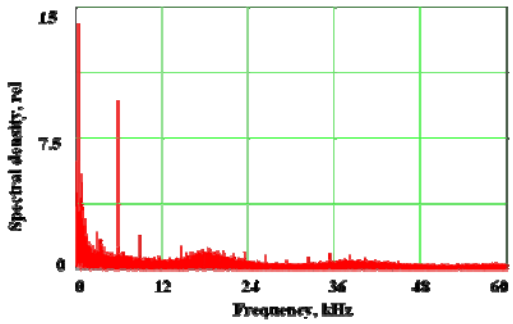


Fig. 2. A typical signal spectrum of the secondary current collected from the plasma during EBW with focus position oscillation (welding power: 2.5 kW, sharp focus regime (ΔI_f = 0), scanning frequency: 1.523 Hz)

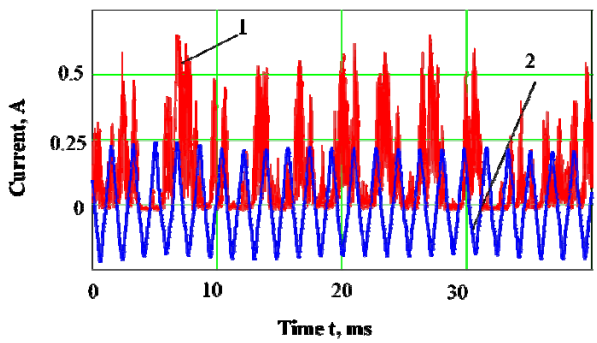


Fig. 3. Records of the secondary current, generated by plasma and of the current in the deflection coils. Welding of steel with the oscillation: P = 2.5 kW, sharp focus (I_f = 840 mA), oscillation frequency f = 561 Hz, sweep size 2A = 0.9 mm. Curve 1 presents high frequency impulses (packed in low frequency oscillation signal) and curve 2 is deflection coils current

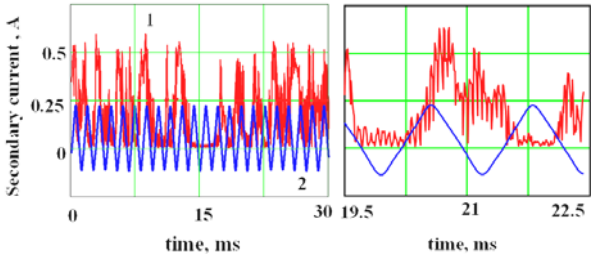


Fig. 4. Waveform of secondary current, collected from the plasma and the signal of the focus coil current during EBW with focus position oscillation: 1 – Secondary current; 2 – Signal from the focusing lens current

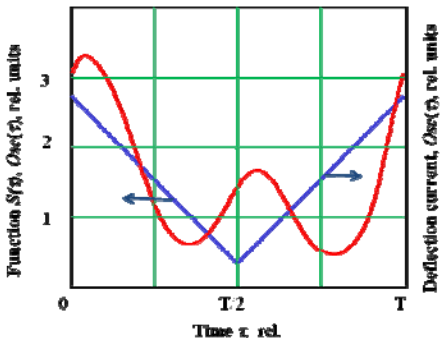


Fig. 5. Record of deflection coils current signal Osc(t) (two straight lines) and function $S(\tau)$ obtained by the coherent accumulation method during the steel welding with oscillation along the joint (P = 3 kW, beam current 50 mA, oscillation frequency f = 630 Hz, oscillations sweep size 2A = 1.5 mm); $S(\tau)$ is for low frequency (up to 2 kHz) oscillations and for focusing current 825 mA (low focused beam)

A result of the treatment of the secondary signal by the method of the coherent accumulation, at the welding process with deflection oscillation along the joint, is presented on fig. 5. There is also shown a record of the deflection coil current Osc(τ). The differences in the maximal amplitudes on fig. 5 and the small shift of the positions of the maximal values of S(τ) in comparison with the positions of the changes of the deflection coil's current directions can be found.

Fig. 6 shows the results of the analysis of the high frequency component of collected by plasma current at modulation of the focusing current, when the beam is over-focused. The change in the sign of the phase shift at changes of the beam focusing position is of major interest. When the beam is under-focused, the phase shift is positive. As the focusing current is increased, the phase shift magnitude decreases monotonically, becoming zero in the region of sharp focus. A similar phenomenon has been observed in the entire range of investigated conditions as well as in the case of oscillating beam studies.

It can be concluded that the time shift and amplitude changes of the maximums in the created by coherent accumulation method curves of probability of excitation of high frequency current component $S(\tau)$ could be a base for new control methods for adjustment of the beam focus position during welding with periodic interactions on the electron beam (the oscillation of the beam or scanning the beam focus). Such method of focus position control, due to monotonic relation of the feedback signal with the focusing lens current, is faster than any known methods, which need the application of an additional focus exploratory scanning.

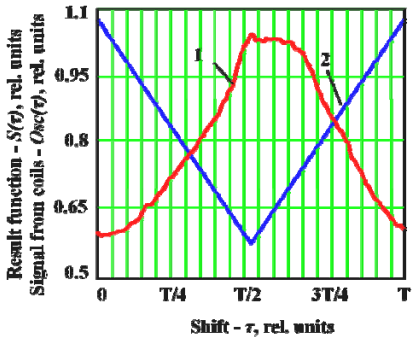


Fig. 6. Curve 1 – Function $S(\tau)$, obtained using the coherent accumulation method on τ, as a result of analysis of the high frequency component of collected from plasma current; Straight lines 2 – Osc(τ) is the record of the focusing lens current (P = 2.5 kW, over-focusing regime (ΔI_f = +17 mA), oscillation frequency f = 966 Hz)

On the weld cross-section control. The metallographic cross-sections of the welds, produced by beam longitudinal oscillations (630 Hz, A=1 mm), shown on fig. 7, *a* and fig. 7, *b* as fig. 8, *a* and fig. 8, *b* are compared.

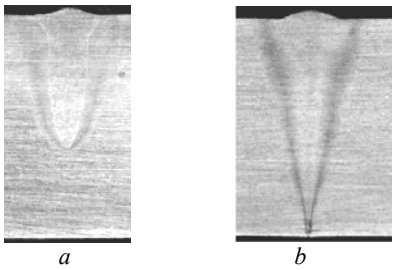


Fig. 7. Metallographic transverse cross-sections of the welds, obtained at focusing currents: 825 mA (*a*); 833 mA (*b*)

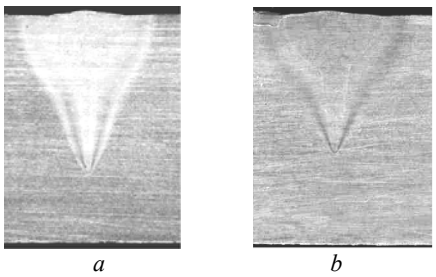
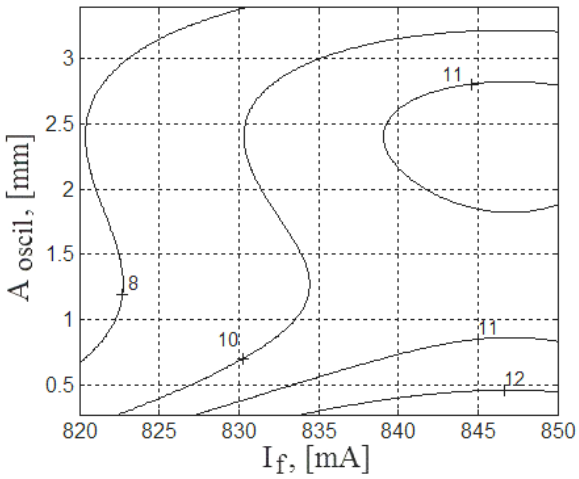


Fig. 8. Metallographic transverse cross-sections of the welds, obtained at focusing currents: 847 mA (*a*); 852 mA (*b*)

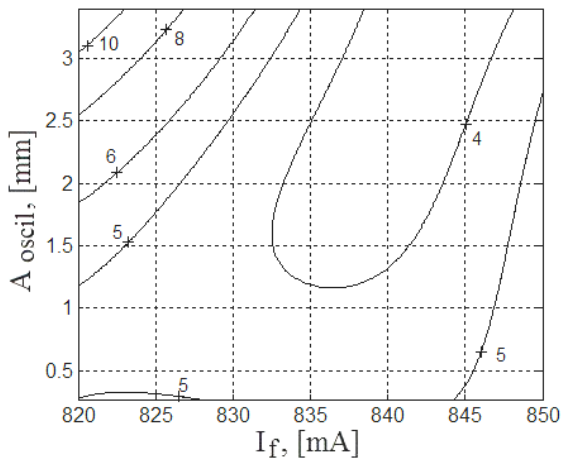
It can be seen that deflection oscillation prevents the appearance of root defects (spiking) only in the case of a low-focused beam, but there the penetration depth is lower than in the case of a sharp-focused beam.

The contour plots of the dependence of the weld depth H and of the weld width at sample surface B on the focusing current I_f and on the amplitude of deflection sweep A_{oscil} under linear longitudinal oscillations of the beam for

the chosen oscillation frequency F_{osc} = 745 Hz are presented in fig. 9. The deflection oscillation amplitudes do not affect the weld depth at small focusing currents (fig. 9, *a*). An increase of the focusing current in this region extends slowly the weld depth. In fig. 9, *a* the region of the deepest welds (i. e., the sharp focus) can be seen at higher focusing currents in the range of 840–855 mA (in comparison with the static beam case, where a sharp focus was observed at 833–835 mA) and at amplitudes between 2 and 2.7 mm.



a



b

Fig. 9. Contour plot of dependence of weld depth H from focusing current I_f and amplitude of beam deflection oscillations A_{oscil} (*a*); contour plot of dependence of weld width on the sample surface from focusing current If and amplitude of beam deflection oscillations A_{oscil} (*b*)

In this case of longitudinal oscillations, as shown in fig. 9, *b*, it can be seen that narrower welds appears at oscillation amplitudes greater than 1.2–1.5 mm and focusing currents higher than 833–840 mA. In the case of down focusing position an increase of the oscillation amplitude extends the surface width of the seam.

Fig. 10 presents the dependences of weld depth H on oscillation amplitude A_{oscil} at constant F_{osc}. The focus position is on 13 mm (sharp focusing of the beam at which maximal weld depth was obtained). At small amplitudes (A_{oscil} < 1 mm) a maximal weld depth is shown, better for frequency of F_{osc} = 200 Hz. At F_{osc} = 1,000 Hz an invariant weld depth can be obtained, in the range of amplitudes of oscillations (1–2.5) mm. The weld depth at F_{osc} = 200 Hz and at amplitudes A_{oscil} < 2.5 mm is higher, than in higher frequencies of oscillations F_{osc} = 1.000 Hz or F_{osc} = 1.400 Hz.

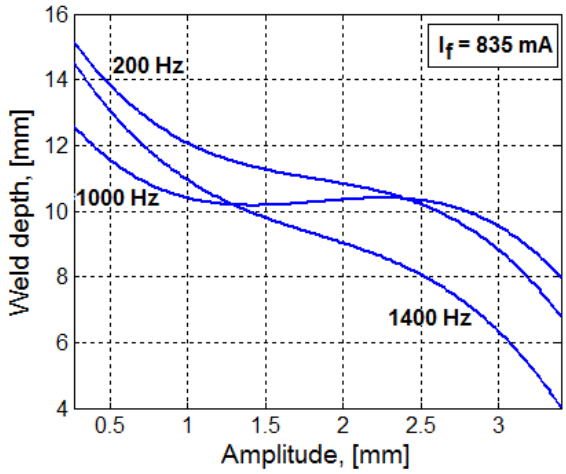


Fig. 10. Dependences of weld depth H on oscillation amplitude A_{oscil} at some frequencies F_{osc} = const of the longitudinal deflection oscillations

In the case of very big oscillation amplitudes (A_{oscil} ≥ 2.5 mm) the weld depth decreases, due to lower values of the beam power density.

On fig. 11 is shown dependences of weld depth from oscillation frequency at three amplitudes of deflection oscillations. In the range of frequencies of oscillations 400–1.000 Hz the weld depths are invariant. In the range of frequencies F_{osc} < 400 Hz small amplitudes lead to higher weld depths. Frequencies F_{osc} ≥ 1.000 Hz and oscillations amplitudes A_{oscil} ≥ 1.5 mm lead to decrease of the weld depths.

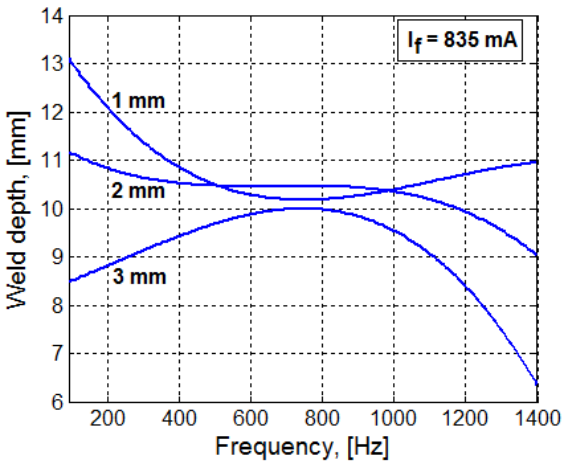


Fig. 11. Dependences of weld depth H on oscillation frequency F_{osc} at some longitudinal amplitudes A_{oscil} = const of the longitudinal beam deflections

In the case of scanning the focusing position along the beam axis at welding chrome-nickel steel the cross-section have a big head and narrow and deep weld

(fig. 12). In some applications a more thick shaft and proportionally smallest head can be acceptable (fig. 13).

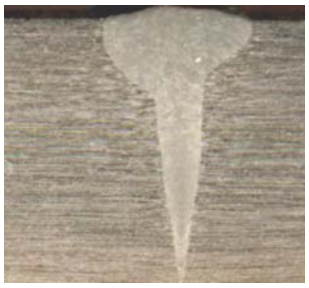


Fig. 12. Weld cross-section at 35 mA beam current, 835 mA focusing current and focus scanning: 9 mA, 960 Hz $v = 5$ mm/s

Fig. 13. Weld cross-section at 31 mA beam current, 826 mA no focus scanning, welding velocity 5 mm/s

On fig. 14 is shown contour plot of dependences of the weld depth on amplitude of focus scanning A and on focusing coil current If. The weld depth has weak dependence from focus scanning amplitude A and known considerable dependence from beam focus position.

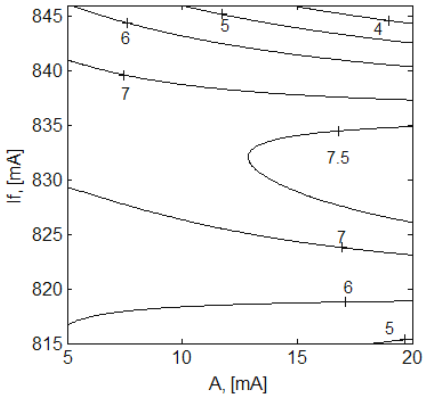


Fig. 14. Contour plot of weld depth on A and If at frequencies of focus scanning $F = 1.116.5$ Hz

On fig. 15 is shown contour plot of weld width on surface (namely width of weld-head) on amplitude of scanning and focusing lens current. One can see the same more strong dependence on position of focus on weld width, as well as that at small amplitudes of focus scanning are the regions of more width welds at down-focused and over-focused beams.

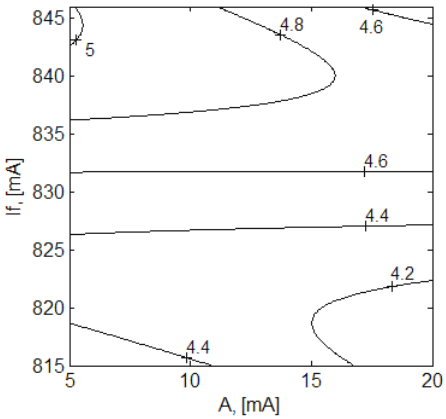


Fig. 15. Contour plot of weld width on surface on A and If at focus scanning frequencies $F = 1.116.5$ Hz

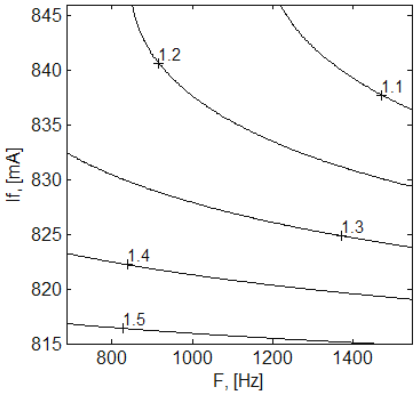


Fig. 16. Contour plot of weld width measured on one-half of the weld depth versus F of focus scanning and focusing current If at scanning amplitude A = 12.5 mA

On fig. 16 is shown the contour plot of weld width, measured on one-half of weld depth on focus scanning frequencies and focusing current at constant scanning amplitude A = 12.5 mA. For over-focused beam an increase of scanning frequency decrease of weld width, as well as at down-focused beam the scanning frequency is practically not affects the weld width, measured at one-half of the weld depth.

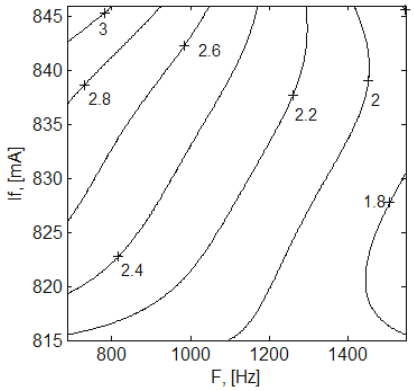


Fig. 17. Dependences of the depth of the weld-head on F of focus scanning and on focusing current If at scanning amplitude A = 12.5 mA

On fig. 17 is shown contour plot of the depth of head (more wider upper part of the weld on *F* of scanning and focusing position at constant amplitudes of scanning and welding speed). Smallest depths of the weld-heads is observable at down-focused beam and higher scanning frequencies.

The study demonstrates the possibility to research of processes in the keyhole at electron-beam welding according to parameters of secondary current in plasma. The signal spectrum of the secondary current at electron beam welding contains a characteristic high-frequency (15…25 kHz) component. The secondary current signal at electron-beam welding with electron beam oscillation presents a series of high-frequency impulses which follow each other with frequency to multiple oscillation frequency. The obtained by coherent accumulation method function $S(\tau)$ has a lag (time shift) in relation to the signal of deflection coils. The Lag value is depended on welding regime and it can be used to in-process control at electron-beam welding. There are three characteristic frequency areas at EBW. In the range up to 100 Hz, from two hundred hertz to two kilohertz, and five kilohertz and more. When the oscillation frequency changes in these ranges, the formation of a secondary signal and weld formation are significantly different, too.

Acknowledgements. This work has been partially carried out with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research, research projects No. 14-08-96008 r_ural_a, No. 13-08-00397A, Grant of the President of the Russian Federation № MD-1366.2014.8. Contract № 14Z56.1366-MD and with financial support from the Russian Ministry of Education and Science within the base part of the state task No. 01201460538.

References

1. Rai R., Burgardt P., Milewski J. O., Lienert T. J., DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during EBW of 21Cr–6Ni–9Mn steel and Ti–6Al–4V alloy, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Jan. 2009, vol. 42, no. 2, pp. 1–12.

2. Rai R., Palmer T. A., Elmer J. W., DebRoy T. Heat transfer and fluid flow during EBW of 304l stainless steel alloy, *Weld. J.*, Mar. 2009, vol. 88, p. 54–61.

3. Dey V., Kumar Pratihar D., Datta G. L., Jha M. N., Bapat T. K. Optimization of bead geometry in EBW using a Genetic Algorithm, *J. of Mat.Proc.Tech.*, Feb. 2009, vol. 209, iss. 3, p. 1151–7.

4. Koleva E. Electron beam weld parameters and thermal efficiency improvement, *Vacuum*, Mar. 2005, vol. 77, iss. 11, p. 413–21.

5. Recommended practices for EBW, ANSI/AWS, American Welding Society, Miami, FL, 1999, p. 1–99.

6. Krinberg I. A., Mladenov G. M. Formation and expansion of the plasma column under electron beam-metal interaction, *Vacuum*, 2005, vol. 77, p. 407–11.

7. Trushnikov D. N., Belen'kiy V. Ya., Yazovskikh V. M., Krotov L. N. Formation of a secondary-emission signal in EBW with continuous penetration, *Weld. Int.*, 2007, vol. 21, no. 5, p. 384–6.

8. Yazovskikh V. M., Trushnikov D. N., Belen'kiy V. Ya. The mechanism of secondary emission processes in EBW with the modulation of the electron beam, 2004, *Weld. Int.*, vol. 18, no. 9, p. 724–9.

9. Trushnikov D. N. Using the wavelet analysis of secondary current signals for investigating and controlling EBW, *Weld. Int.*, DOI:10.1080/09507116.2012.715932, Oct. 2012, to be published.

10. Max J. *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*, 3rd ed., Jean-Louis Lacoume, Paris, 1981, vol. I, p. 10–50.

11. Orfanidis S. J. *Optimum Signal Processing. An Introduction*, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 1996, p. 5–30.

12. Trushnikov D., Belenkiy V., Shchavlev V., Piskunov A., Abdullin A., Mladenov G., Plasma charge current for controlling and monitoring EBW with beam oscillation, *Sensors*, 2012, vol. 12, p. 17433–45.

13. Smurov I. Y., Uglov A. A., Lashyn A. M., Matteazzi P., Covelli L., Tagliaferri V., Modelling of pulse-periodic energy flow action on metallic materials, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 1991, vol. 34, p. 961–71.

14. Kovaleski S. D., Gilgenbach R. M., Ang L. K., Lau Y. Y. Dynamics of electron beam ablation of silicon dioxide measured by dye laser resonance absorption photography, *Appl.Phys.Letters*, 1998, vol. 73, no. 18, p. 2576– 2578.

15. Mueller G., Konijnenberg M., Kraft G., Schultheiss C. Deposition by means of pulsed electron beam ablation, in *Science and Technology of thin film*, World Scientific Publ.Co PET LTD, 1995.

© Trushnikov D. N., Koleva E.,
Mladenov G., Shcherbakov A. V., 2014

Раздел
Part
4

ЭКОНОМИКА

ECONOMICS

УДК 338.45:629

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 232–238

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТРАТЕГИЧЕСКИХ АЛЬТЕРНАТИВ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Л. В. Ерыгина, Н. О. Макаренко

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

Ракетно-космическая промышленность (РКП) традиционно играет ведущую роль в обеспечении военно-экономической безопасности, оказывая существенное влияние на уровень военного, экономического, научного потенциалов России. Однако негативные последствия перехода к рыночной экономике имели самые серьезные последствия для этой сферы. В настоящий момент РКП находится на переломном этапе своего развития. С одной стороны, существует многолетний опыт осуществления проектов по большинству направлений космической деятельности, создана обширная производственная и научно-исследовательская инфраструктура. С другой – переход на рыночные отношения в 90-х годах, финансовый кризис 2008 года оказали серьезное негативное влияние на отрасль. В результате, многочисленные накапливающиеся с годами проблемы способны оттеснить отечественную РКП на обочину экономического развития. Заметное в настоящее время крупномасштабное финансирование еще не гарантирует достижение результатов, что наглядно демонстрируется снижением показателей деятельности РКП. Это говорит о необходимости доработки и расширения существующего инструментария управления ракетно-космической отраслью. Формирование направлений и механизма рыночной трансформации предприятий РКП находится на распутье между методами плановой экономики, уже не отвечающими рыночным реалиям, и современными подходами стратегического и инновационного менеджмента, которые не имеют еще в России прочной методической основы. Таким образом, необходимо совершенствование методов стратегического планирования, в частности, разработка инструментов выбора стратегии развития предприятий РКП. Представлены типы предприятий ракетно-космической отрасли в зависимости от целей инновационной деятельности и их возможностей. Подразделение предприятий на выделенные группы важно для определения направлений выбора стратегии развития. Помимо этого, указывается необходимость комплексного исследования внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на развитие выделенных групп предприятий отрасли, которые, в свою очередь, должны подлежать учету при разработке инструментов выбора стратегии развития и найти свое отражение в структуре их инновационного потенциала. В статье также представлен концептуальный подход к выбору стратегии развития, основанный на определении стратегических альтернатив развития с выделением структуры инновационного потенциала и его оценки, а также с учетом возможности диффузии, реализации и коммерциализации инноваций, созданных в основном производстве предприятий РКП.

Ключевые слова: ракетно-космическая промышленность, стратегии, космическая деятельность, инновационный потенциал.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 232–238

CONCEPTUAL APPROACH TO THE DEFINITION OF THE STRATEGIC ALTERNATIVES OF THE ENTERPRISES DEVELOPMENT OF THE SPACE-ROCKET INDUSTRY

L. V. Erygina, N. O. Makarenko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: erigina@sibsau.ru, makarenko_nastja@mail.ru

The Space-rocket Industry (SRI) traditionally plays the leading role in ensuring military-economic safety, having essential impact on level of military, economic, scientific capacities of Russia. However, negative consequences of transition to market economy had the most serious consequences for this sphere. At the moment SRI is at a critical stage of the development. On the one hand, there is a long-term experience that successfully realizes the projects on the majority of the space activity directions, the extensive production and research infrastructure are created. On the other hand, transition to the market relations in the 90-th, financial crisis of 2008 year had a negative impact on the branch.

As a result, numerous problems collecting over the years are capable to push aside home industry SRI on a roadside of economic development. The bills adopted in recent years provide formation of economically steady, competitive, diversified SRI, and as ensuring the guaranteed access and necessary presence of Russia at a space. However, there are presented only the purposes, tasks and stages of their performance, but thus aren't specified mechanisms, ways, tools which will provide effective planning, distribution and control over use of allocated resources. Large-scale financing noticeable now doesn't guarantee the achievement of results that is clearly demonstrated by decrease in indicators of activity of SRI. It tells about need of completion and expansion of existing tools of management with space-rocket branch. Formation of the directions and the mechanism of market transformation of the enterprises SRI to be at the crossroads between methods of the planned economy untrue market realities and modern approach of strategic and innovative management, which doesn't methodical based in Russia. Thus, it is necessary improvement the methods of strategic planning, in particular, development the choice tools of the development strategy for the enterprises of SRI. In the article the types of the enterprises of space-rocket branch depending on the purposes of innovative activity and their opportunities are presented. Division the enterprises on the allocated groups important for definition the choice directions of the development strategy. In addition, in the article a need complex research of the external and internal factors having impact on development of allocated groups of space-rocket enterprises, which in turn have to be subject to the account when developing tools the choice of the development strategy and find the reflection in structure of their innovative potential is pointed out. Moreover, the conceptual approach to a choice of the development strategy, based on definition of strategic alternatives of development with allocation the structure of innovative potential and its assessment, and as taking into account possibility of diffusion, realization and commercialization the innovations created in the main production of the enterprises SRI is presented.

Keywords: space-rocket industry, strategy, space activity, innovative potential.

Введение. Ракетно-космическая промышленность (РКП) России – наиболее высокотехнологичная и наукоемкая отрасль, одна из передовых, стабильно и динамично развивающихся. Предприятия РКП выпускают всю номенклатуру космической техники – от тяжелых ракет-носителей до малых космических аппаратов [1]. Но в настоящее время РКП находится на переломном этапе своего развития. С одной стороны, накоплен опыт реализации крупных проектов по большинству направлений космической деятельности (КД), имеется огромная база производственных и научно-исследовательских возможностей. С другой стороны, переход на рыночные отношения оказал негативное влияние на отрасль: дефицит финансирования, прогрессирующее физическое и моральное старение основных фондов и технологий, утрата преемственности качественного состояния научных и производственных кадров, сворачивание научной деятельности и другие проблемы, которые способствуют снижению конкурентоспособности РКП.

На фоне указанных трудностей оптимистично выглядит проект Стратегии развития космической деятельности до 2030 г., разработанный Роскосмосом, предусматривающий не только восстановление утраченных позиций, но и «обеспечение мирового уровня российской космонавтики и закрепление России к 2030 г. в тройке ведущих мировых космических держав». Предусматривается, что к 2030 г. отечественные аппараты будут обеспечивать 95 % нужд потребителей (сегодня это менее 40 %), количество научных запусков составит до трех в год, доля России на мировом космическом рынке увеличится с 0,5 до 10 %. К 2015 г. космическую отрасль реорганизуют в четыре-пять конкурирующих вертикально интегрированных структур и приборостроительную корпорацию. Финансирование стратегии развития отрасли до 2030 г. может составить 150–200 млрд руб. в год. При этом важно отметить, что данная Стратегия, а также Федеральная целевая космическая программа России, действующая в настоящий момент, выделяют лишь цели и задачи, а не конкретные механизмы их достижения [2; 3]. Крупномасштабное финансирование РКП, которое наблюдается в настоящее время, не дает гарантий достижения поставленных задач, что наглядно демонстрируется снижением показателей производства в отрасли [4] (табл. 1).

Таблица 1

Индекс производства по видам экономической деятельности

Обрабатывающие производства	2011	2012
Производство машин и оборудования	109,5	100,4
Производство транспортных средств и оборудования	124,6	112,7

Эффективность деятельности предприятий отрасли должна основываться на использовании современных инструментов управления. Это говорит о необходимости доработки и усовершенствования существующего инструментария с учетом мировых тенденций развития.

Механизмы директивного управления научно-техническим прогрессом привели к образованию в России (СССР) двух отличающихся друг от друга секторов экономики, приоритетным из которых по финансированию, обеспеченности ресурсами и кадровому потенциалу является научно-промышленный комплекс, связанный с решением оборонных задач. В интересах соблюдения военно-стратегического партнерства в Советском Союзе было налажено современное высокотехнологичное производство всех необходимых видов вооружения и военной техники. Но режим секретности в разработке и выпуске военной продукции не позволял оценить экономическую эффективность реализации инноваций военного производства в гражданском секторе. Большая часть ресурсов, финансы, научный, интеллектуальный и промышленный потенциалы использовались для

создания исключительно военной техники и оружия, а технологические достижения оборонно-промышленного комплекса ограниченно применялись в рамках «гражданских» потребностей [5].

Рост конкуренции на мировых космических рынках, обусловленный в первую очередь активными действиями новых стран-игроков (Китай, Индия), уже сейчас не позволяют России использовать традиционное преимущество разработанных научных заделов, а также низких цен на космическую продукцию и услуги. В результате требуется скорейший пересмотр существующей стратегии развития РКП в направлении максимального использования передовых технологий, наращивания инновационного потенциала, создания механизма обмена технологиями между военными и гражданскими секторами экономики за счет использования двойных технологий.

Основная часть. Формирование направлений и механизма рыночной трансформации предприятий РКП находится на распутье между методами плановой экономики, уже не отвечающими рыночным реалиям, и современными подходами стратегического и инновационного менеджмента, которые не имеют еще в России прочной методической основы. Таким образом необходимо совершенствование методов стратегического планирования, в частности, разработка инструментов выбора стратегии развития предприятий РКП [6; 7].

В зависимости от целей инновационной деятельности и возможностей предприятий РКП осваивать и реализовывать продукцию двойного назначения их можно подразделить на две группы [8].

Первая группа предприятий – это предприятия, особенность которых проявляется в зависимости от государственного оборонного заказа (ГОЗ). Специфика выполнения ГОЗ заключается в том, что такие предприятия лишь перенимают технологии производства создания ракетно-космической техники (РКТ), разработанные научно-исследовательскими институтами. Задачей же таких предприятий является освоить уже разработанные технологии и внедрить в производство, выполнив при этом необходимое техническое перевооружение. Но нестабильность ГОЗ ухудшает экономические показатели деятельности предприятий. Большие накладные расходы, отражаясь на цене производимой продукции и услуг, приводят к снижению их прибыли. Поддержание устойчивого финансового состояния является основной целью деятельности предприятий первой группы. В связи с этим стратегии их развития связаны с коммерциализацией накопленного инновационного потенциала путем передачи (диффузии) технологий основного производства в гражданский сектор, что обеспечит необходимую дозагрузку производственных мощностей, снижение затрат и позволит сохранить финансовое состояние предприятий.

Вторая группа предприятия РКП – это чаще всего крупные корпорации, имеющие собственную научно-исследовательскую и конструкторскую базу и осуществляющие весь инновационный цикл: от зарождения идеи до ее производства и коммерциализации. Вовлечение в коммерческий оборот объектов инновационного потенциала для предприятий второго типа является дополнительным источником финансирования для поддержания опережающего воспроизводства инновационного потенциала, повышения конкурентоспособности производимой продукции и услуг военного и гражданского назначения. Стратегии развития предприятий второй группы направлены на развитие научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, поддержание необходимого кадрового уровня.

Таким образом, развитие предприятий РКП связано с использованием их инновационного потенциала и с реализацией различных целей их деятельности: поддержание устойчивого финансового состояния и формирование источника обеспечения опережающего воспроизводства инновационного потенциала, что определяет различные направления стратегии развития [8].

Выбор стратегии развития предприятий РКП с учетом их стратегических целей требует комплексного исследования факторов, оказывающих влияние на развитие предприятий отрасли.

Их можно подразделить на две большие группы:

– внешние: наличие и объем государственного оборонного заказа; потребительский рынок технологий (уровень технологии, структура, приоритеты, тенденции спроса); конкурентная среда (состав конкурентов, в том числе зарубежных, их экономические характеристики и стратегии); неразвитость межотраслевого взаимодействия и др.

– внутренние: наличие конкурентоспособных исследований и разработок; отсутствие системы передачи технологий; уровень прогрессивности и универсальности техники и технологии производства; уровень загрузки производственных мощностей; уровень обеспеченности персоналом; уровень квалификации персонала; наличие запасов сырья и материалов; наличие собственных финансовых средств; наличие сбытовых сетей и др.

Исследованные факторы были систематизированы по следующим классификационным признакам: сфера влияния, степень управляемости и характер информации. Выделенные факторы отражают специфику предприятий РКП для выделенных групп и оказывают различное влияние на выбор стратегии развития. Так, например, при выборе стратегии развития «уровень загрузки производственных мощностей» является одинаково важным для обеих групп предприятий. Однако в одном случае выбор стратегии направлен на поиск инновационных проектов для загрузки и использования «простаивающих» мощностей в силу нестабильности ГОЗ, а во втором – из-за возможного их дефицита выбор стратегии будет направлен или на их расширение, как путем собственных сил, так и кооперации, или возможна простая продажа инновационной технологии для финансирования передовых разработок.

Для предприятий первой группы, внедряющих результаты НИОКР, разработанные исследовательскими институтами, важным фактором является «наличие завершенных конкурентоспособных разработок и технологий», что определяет возможности таких

предприятий и дальнейший выбор стратегии развития. В свою очередь, данный фактор не является существенным для предприятий второй группы, осуществляющих самостоятельно научные исследования и разработки технологий для производства РКТ.

Сегодня «экономика космоса» вышла за рамки традиционного сектора космических услуг (спутников, космических запусков) и включила в себя ряд новых услуг и продуктов. Это вызвало широкий интерес к КД, расширение стран-участников и рост объемов финансирования. Мировой рынок космических услуг за последние 10 лет вырос в пять раз и сегодня превышает 500 млрд долл. в год [9–11]. В свою очередь, высокая рентабельность в сфере космических услуг позволяет рефинансировать доходы в разработку и создание передовых «прорывных» инноваций как для военного назначения, так и для гражданского сектора. Поэтому осуществлять выбор стратегии развития предприятий РКП в рамках коммерциализации их инновационного потенциала невозможно без учета факторов маркетинговой сферы: «уровень конкурентной среды», «рынок технологий», «наличие платежеспособного спроса», «наличие сбытовых сетей». Ранее эта сфера не имела большой значимости в связи с постоянным наличием госзаказа у предприятий отрасли. В отличие от «технического» взгляда «рыночный» характеризует коммерциализацию инновационного потенциала как новую форму маркетинговой деятельности, обусловленную проникновением в те сферы рынка, которые до сих пор не представляли коммерческого интереса для предприятий РКП. Перспективность развивающихся космических рынков предъявляет требования к наличию у предприятий отрасли маркетинговых возможностей, и рыночные факторы оказывают существенное влияние на способность предприятий коммерциализировать их инновационный потенциал независимо от поставленных целей.

Большинство из проанализированных факторов оказывают существенное влияние на выбор стратегии развития предприятий РКП. Таким образом, они должны подлежать учету при разработке инструментов выбора стратегии развития предприятий отрасли и найти отражение в декомпозиции их инновационного потенциала. Развитие инновационного потенциала позволяет создать базовые условия для создания конкурентоспособной продукции на регулярной основе, что открывает путь к долгосрочному доминированию на рынках высокотехнологичной продукции.

Современное состояние РКП, существующие тенденции развития, выявленные особенности деятельности разных групп предприятий РКП, выделенные факторы, оказывающие влияние на выбор стратегии развития, предполагают необходимость разработки нового концептуального подхода к выбору стратегии развития, основанного на определении стратегических альтернатив развития с выделением структуры инновационного потенциала и его оценки, а также с учетом возможности диффузии, реализации и коммерциализации инноваций, созданных в основном производстве предприятий РКП.

Основные положения концептуального подхода заключаются:

– в переходе к стратегическому уровню управления развития предприятий отрасли;

– необходимости учета целей развития предприятий;

– развитии системы трансформации технологий военного назначения в создание и производство гражданской продукции;

– учете количественной и качественной составляющей востребованного инновационного потенциала и возможности его диффузии, реализации и коммерциализации.

Реализация предложенного концептуального подхода определяет необходимость формулирования принципов выбора стратегии развития для разных групп предприятий РКП согласно поставленным целям.

В ходе исследования были изучены и выделены основные принципы стратегического планирования: комплексности, целенаправленности, иерархичности, непрерывности, согласованности, гибкости, релевантности, адаптивности, альтернативности, устойчивости, динамичности, полифункциональности и др. [12–15]. В исследовании уже к существующим принципам планирования были предложены принципы выбора стратегии: взаимного влияния, реализуемости, инновационности, диффузионности, перспективности, учета характера внедряемой инновации, учета структуры востребованного инновационного потенциала.

Сформулированные принципы и их соответствие предложенным концептуальным положениям представлены в табл. 2.

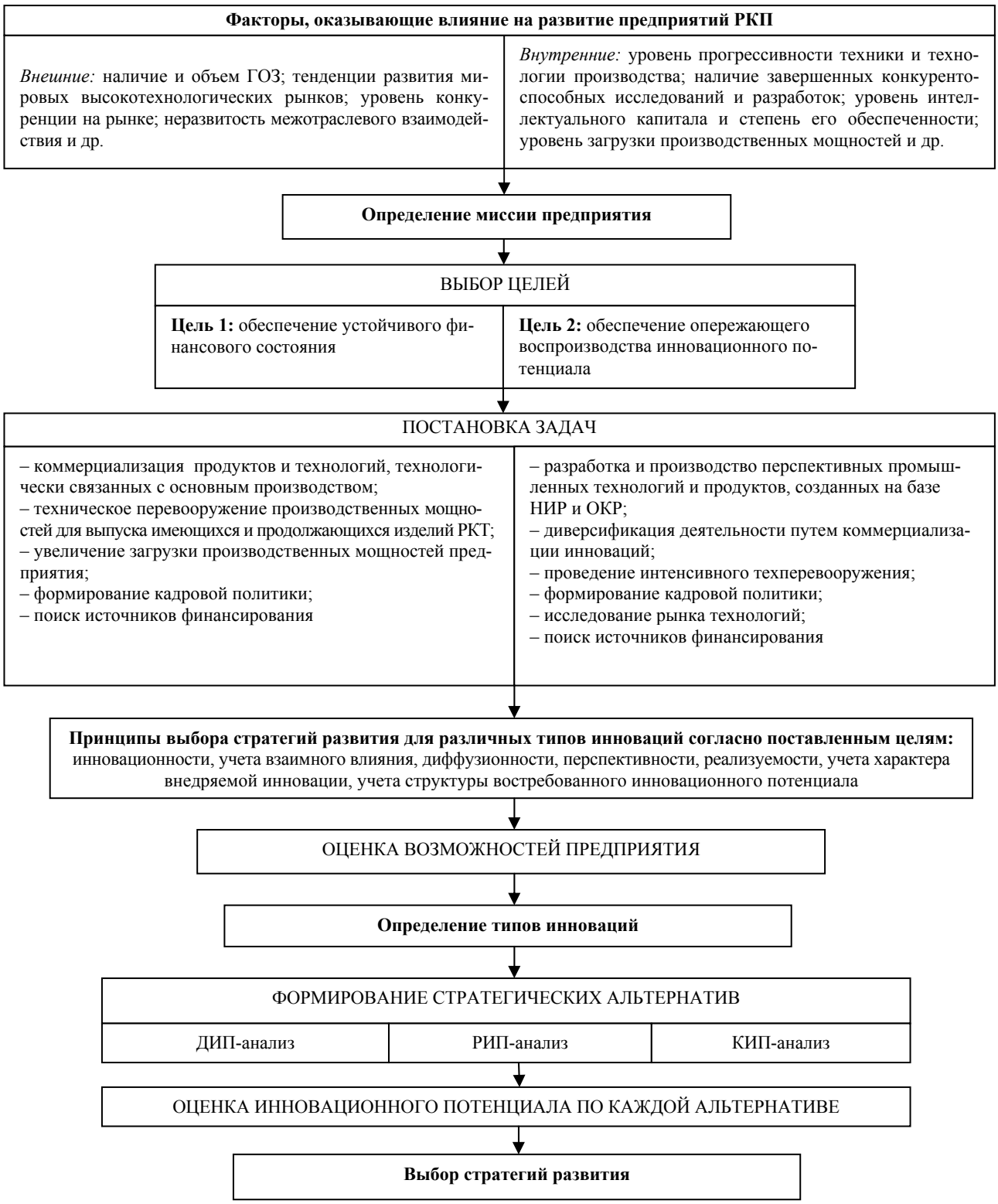
На рисунке представлена структурно-логическая схема выбора стратегии развития предприятий РКП.

Таблица 2

Принципы выбора стратегии развития в соответствии с предложенными концептуальными положениями

Концептуальные положения	Принципы
Необходимость введения стратегического уровня управления	Инновационности Реализуемости Перспективности
Система планирования должна учитывать цели, которые ставят перед собой предприятия РКП	Учет характера внедряемой инновации Диффузионности Реализуемости
Развитие системы трансформации технологий военного назначения в создание и производство гражданской продукции	Взаимного влияния Диффузионности Инновационности Перспективности
Учет количественной и качественной составляющей востребованного инновационного потенциала и возможность его диффузии, реализации и коммерциализации	Учет структуры востребованного инновационного потенциала

1. Принцип инновационности подразумевает способность производить и реализовывать продукты преимущественно инновационного характера с помощью поддерживаемой на современном научном уровне технологической базы на постоянной воспроизводственной основе с использованием управленческих инноваций при выборе стратегии развития для создания непрерывного процесса повышения уровня развития предприятий отрасли.



Структурно-логическая схема выбора стратегии развития предприятий РКП

2. Принцип реализуемости подразумевает возможность реализации научно-технического и технологического потенциала предприятий РКП, альтернативной государственным заказам, путем создания гражданской продукции прорывного характера.

3. Принцип перспективности предполагает необходимость оценки перспективности реализации гражданских проектов и технологий с точки зрения их влияния на экономические показатели деятельности предприятия для дальнейшего выбора стратегии развития.

4. Принцип взаимного влияния предполагает, что научно-техническое состояние основного производства предприятий РКП оказывает влияние на выбор стратегии развития. Возможность коммерциализации технологий двойного назначения и получения прибыли, в свою очередь, является дополнительным источ-

ником обеспечения постоянного развития инновационного потенциала предприятий отрасли.

5. Принцип диффузионности предполагает определение, анализ и поиск дополнительных альтернативных направлений возможного применения разработанных военных технологий на предприятиях РКП.

6. Принцип учета характера внедряемой инновации основывается на принципиальных отличиях в освоении разных типов инноваций (несущие в себе радикальные изменения или только усовершенствование существующих технологий), что оказывает влияние на выбор стратегии развития с точки зрения возможности и достаточности потенциала предприятий отрасли для производства новых или улучшающих технологий.

7. Принцип учета структуры востребованного инновационного потенциала заключается в том, что выбор стратегии развития предприятий РКП должен основываться на анализе и оценке их инновационного потенциала. В зависимости от степени состояния различных его элементов осуществляется планирование и выбор той или иной стратегии инновационного развития.

Заключение. Предложенный концептуальный подход и сформулированные принципы являются основой для разработки методических инструментов выбора стратегии развития предприятий ракетно-космической отрасли.

Библиографические ссылки

1. Перминов А. Н. Модернизация ракетно-космической промышленности на современном этапе: проблемы и пути решения [Электронный ресурс]. URL: http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-7/III/Perminov.pdf.

2. Бауэр В. П., Ковков Дж. В., Московский А. М. Состояние и механизмы развития ракетно-космической промышленности России. М. : Ин-т экономики РАН, 2012. 53 с.

3. Федерально-целевая программа «Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу» [Электронный ресурс]. URL: http://www.roscosmos.ru/main.php?id=402.

4. Россия 2013 : стат. справ. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2013/rus13.pdf.

5. Влияние военного производства на экономический рост [Электронный ресурс]. URL: http://csef.ru/index.php/ru/oborona-i-bezopasnost/project/466-the-economic-security-of-the-state/1-stati/2117-The-influence-of-military- production-to-economic-growth.

6. Окатьев Н. А. Стратегические подходы к развитию ракетно-космической промышленности РФ в условиях нестабильности мировой экономики [Электронный ресурс]. URL: http://www.rad.pfu.edu.ru:8080/tmp/avtoref4145.pdf.

7. Трифилова А. А. Управление инновационным развитием предприятия. М. : Финансы и статистика, 2003. 176 с.

8. Гильц Н. Е. Инструменты контроллинга производства гражданской продукции на машиностроительном предприятии ОПК [Электронный ресурс]. URL: http://www.sibsau.ru/images/avtoreferat/2013_11_26_avtoreferat_gilc.pdf.

9. Никитина О. Л. Развитие наукоемких отраслей [Электронный ресурс]. URL: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2012_1/pdf/241nikitina.pdf.

10. Ченцова М. Космическая промышленность РФ: тенденции, перспективы, новые рынки [Электронный ресурс]. URL: http://www.space-ins.ru/index.php/kategoria2/171-2010-10-25-08-18-49.html.

11. Беляков Г. П., Еремеева С. В. Понятие и сущность инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности [Электронный ресурс]. URL: http://teoria-practica.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/2013/11/ekonomika/belyakov-eremeyeva.pdf.

12. Ерыгин Ю. В., Цветных А. В. Инструменты стратегического планирования инновационного развития предприятий ОПК / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2009. С. 68.

13. Бузеко И. Р., Дмитриенко И. Е., Сущенко О. А. Стратегический потенциал и формирование приоритетов в развитии предприятий. Алчевск : Изд-во ДГМИ, 2002. 216 с.

14. Василенко В. О., Шматько В. Г. Инновационный менеджмент. Киев : ЦУЛ : Феникс, 2003. 440 с.

15. Васюхин О. В. Управление инновационной деятельностью предприятия в условиях диверсификации бизнеса // Инновации. 2004. № 3. С. 73.

References

1. Perminov A. N. *Modernizaciya raketno-kosmicheskoi promishlennosti na sovremennom etape: problemi i puti resheniya* [Modernization of the space-rocket industry at the present stage: problems and solutions]. (In Russ.) Available at: http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-7/III/Perminov.pdf.

2. Bauer V. P. *Sostoyanie i mehanizmi razvitiya raketno-kosmicheskoi promishlennosti Rossii* [State and mechanisms of development of the space-rocket industry of Russia]. Moscow, Institut ekonomiki RAN Publ., 2012. 53 p.

3. *Federalno-celevaya programma "Strategiya rozvitiya kosmicheskoi deyatelnosti Rossii do 2030 I na dalneishuy perspektivu"*[Federal and target program "Strategy of Development of Space Activity of Russia till 2030 and on Further Prospect"]. (In Russ.) Available at: URL: http://www.roscosmos.ru/main.php?id=402.

4. *Rossiya 2013 : statisticheskiy spravochnik.* [Russia 2013: statistical reference book]. Available at: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2013/rus13.pdf.

5. *Vliyanie voennogo proizvodstva na ekonomicheskiy rost* [Influence of military production on economic growth]. (In Russ.) Available at: http://csef.ru/index.php/ru/oborona-i-bezopasnost/project/466-the-economic-security-of-the-state/1-stati/2117-The-influence-of-military-production-to-economic-growth.

6. Okatev N. A. *Strategicheskie podhodi k razvitiu raketno-kosmicheskoi promishlennosti RF v usloviyah nestabilnosti mirovoi ekonomiki* [Strategic approaches to development of the space-rocket industry of the Russian

Federation in the conditions of instability of world economy]. (In Russ.) Available at: http://www.rad.pfu.edu.ru:8080/tmp/avtoref4145.pdf.

7. Trifilova A. A. *Upravlenie innovacionnim razvitiem predpriyatiya* [Management of innovative development of the enterprise]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2003. 176 p.

8. Gilc N. E. *Instrumenti proizvodstva gragdanskoi produkcii na mashinostroitelnom predpriyatii OPK* [Instruments of controlling of production of civil production at the OPK machine-building enterprise]. (In Russ.) Available at: http://www.sibsau.ru/images/avtoreferat/2013_11_26_avtoreferat_gilc.pdf.

9. Nikitina O. L. *Razvitie naukoemkih otrasley* [Development of the knowledge-intensive branches]. (In Russ.) Available at: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pa2012_1/pdf/241nikitina.pdf.

10. Chencova M. *Kosmicheskaya promishlennost RF: tendencii, perspektivi, novie rinki* [Space industry of the Russian Federation: tendencies, prospects, new markets]. (In Russ.) Available at: http://www.space-ins.ru/index.php/kategoria2/171-2010-10-25-08-18-49.html.

11. Belyakov G. P., Eremeeva S. V. *Ponyatie i sushnost innovacionnogo potenciala naukoemkogo predpriyatia raketno-kosmicheskoi promishlennosti* [Concept and essence of innovative capacity of the knowledge-intensive enterprise of the space-rocket industry]. (In Russ.) Available at: http://teoria-practica.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/2013/11/ekonomika/belyakov-eremeyeva.pdf.

12. Erigin Y. V., Cvetnih A. V. *Instrumenti strategicheskogo planirovaniya innovacionnogo razvitiya predpriyatiy OPK* [Instruments of strategic planning of innovative development of defense industry enterprises]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009, 172 p.

13. Buzeko I. R., Dmitrienko I. E., Sushenko O. A. *Strategicheskiy potencial i formirovanie prioritetov v razvitii predpriyatiy* [Strategic potential and formation of priorities in development of the enterprises]. Alchevsk, DGMI Publ., 2002, 216 p.

14. Vasilenko V. O., Shmatko V. G. *Innovacionniy menedgment* [Innovative management]. Kiev, TSUL, Feniks Publ., 2003, 440 p.

15. Vasuhin O. V. [Management of innovative activity of the enterprise in the conditions of business diversification]. *Innovacii.* 2004, no. 3, p. 73–76. (In Russ.)

© Ерыгина Л. В., Макаренко Н. О., 2014

УДК 658.5

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 239–244

ФОРМИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ГОТОВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ К РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ПРЕДПРИЯТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

С. Г. Кукушкин[1], У. С. Подвербных[2], С. М. Самохвалова[2]

[1]ОАО «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: verba07.90@mail.ru

Государственные приоритеты в области космической деятельности Российской Федерации ставят перед предприятиями космической отрасли стратегические цели освоения новых подходов к управлению. Уникальность и сложность космической продукции, точные ресурсные ограничения этапов ее жизненного цикла определяют необходимость применения проектного подхода по отношению ко всей системе управления предприятием, в том числе и к подсистеме управления персоналом.

Приводится описание некоторых концептуально-методических аспектов обеспечения инновационной готовности кадровой подсистемы управления к реализации проектов ракетно-космического предприятия.

В качестве основы выбора и применения инструментов и технологий проектного управления предлагается укрупненная типология проектов ракетно-космического предприятия, включающая основные проекты разработки, производства и эксплуатации космических летательных аппаратов и систем, вспомогательные проекты (логистические, информационные, кадровые, PR, маркетинговые, коммуникационные и т. д.).

Инновационная готовность системы управления персоналом проектно-ориентированного предприятия – достигнутый структурно-организационный, функциональный, компетентностный потенциал системы управления персоналом, обеспечивающий разработку, апробацию и масштабирование новшеств, целевую результативность проектов предприятия.

Декомпозиция уровней инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов ракетно-космического предприятия включает готовность кадровой службы к управлению собственными проектами внедрения кадровых новшеств, а также кадровую поддержку основных производственных проектов предприятия, заключающуюся в разработке и реализации бизнес-процессов управления командами проектов.

Идентификацию и оценку инновационной готовности предлагается осуществлять по следующим параметрам: структурная, функциональная и информационная готовность системы управления.

На примере достигнутого опыта мирового лидера в области создания средств телекоммуникаций и космической связи ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» (г. Железногорск, Красноярский край) представлена характеристика инновационной готовности системы управления персоналом в условиях проектного управления.

Приведенная модель оценки уровня инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов основана на декомпозиции уровней инновационной готовности и предполагает последовательную экспертную оценку по частным критериям и дальнейшую интегральную свертку. Выводы по итогам оценки дают возможность определить «узкие» места, создающие угрозу для достижения проектных целей, обосновать действия по их устранению.

Использование данного методического инструментария на ракетно-космическом предприятии, при условии его интеграции в единую систему управления проектами, позволяет выполнять требования заказчиков продукции к функциональным, качественным, стоимостным и временным характеристикам современных космических систем.

Ключевые слова: проекты ракетно-космических предприятий, система управления персоналом, инновационная готовность.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 239–244

FORMATION OF INNOVATIVE READINESS OF A PERSONNEL MANAGEMENT SYSTEM FOR THE BENEFIT OF IMPLEMENTATION OF PROJECTS RELATED TO AEROSPACE ENERPRISE

S. G. Kukushkin[1], U. S. Podverbnikh[2], S. M. Samokhvalova[2]

[1] JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin St., 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: verba07.90@mail.ru

The state priorities of the Russian Federation in the field of space activity set long-range goals to find new approaches in management for the space industry. The uniqueness and complexity of space production, exact resource limits of its life cycle stages define necessity of project approach to the whole enterprise management system, including personnel management subsystem.

The article provides a description of some of the conceptual and methodological aspects of personnel management subsystem innovation preparedness to implementation of rocket-space enterprise projects.

An integrated typology of rocket-space enterprises projects is proposed as a base for selection and application of project management instruments and technologies. This typology also contains main projects of the development, production and operation of spacecraft and systems, auxiliary projects (logistics, it, HR, PR, marketing, communications and etc.).

The personnel management system innovation preparedness of project-oriented enterprise – a state-of-the-art structural-organizational, functional, competence potential of personnel management system, that ensure development, testing and scaling innovation, target project performance of the enterprise.

Decomposition of levels of the personnel management system innovation preparedness to implementation of rocket-space enterprise projects includes personnel Department's availability for managing own personnel management projects implementation as well as personnel support for key industrial projects, consisting in the development and implementation of business process management commands projects.

The implementation of innovative preparedness identification and assessment is proposed to accomplish according to the parameters: structural, functional and information system availability management.

The article presents the characteristics of the personnel management system innovation preparedness in terms of project management by the example of public corporation "Information satellite systems" of a name of academician M. F.Reshetnev (Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region) – the world leader in the field of creation of means of telecommunication and space communication. The model for assessment of the personnel management system innovation preparedness to implementation projects, stated in the article, is based on decomposition of levels of innovation preparedness and proposes a serial expert evaluation on individual criteria and further integral convolution. Conclusions of the evaluation results give an opportunity to determine "weak points", endangering for achievement of project goals, and justify actions on their elimination. The usage of this methodological toolkit at rocket-space enterprise, on the assumption of its integration into a unified system of project management, allows to fulfill the requirements of customers by functional, quality, cost and time characteristics of modern satellite systems.

Keywords: projects of aerospace enterprises, personnel management system, innovative readiness.

Приоритетом государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности определена разработка и реализация масштабных проектов освоения космоса, создания новых космических систем [1]. Реализация проектного подхода к управлению отечественным ракетно-космическим предприятием является новшеством и требует инновационной готовности всех подсистем управления.

Проектное управление персоналом как наиболее ценным инновационным активом ракетно-космического предприятия должно предполагать структурную, функциональную и информационную готовность системы управления персоналом к выполнению проектов разработки космических аппаратов. Совокупность данных факторов обусловила актуальность представленного исследования.

Целью данного исследования является разработка концептуальных и методических предложений по обеспечению инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов аэрокосмических предприятий.

Задачи исследования**:**

– обосновать принадлежность предприятий ракетно-космической отрасли к проектно-ориентированным структурам;

– выявить стратегические проектные ориентиры инновационной готовности ракетно-космических предприятий с учетом требований государственной

политики Российской Федерации в области космической деятельности, Государственной программы «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы»;

– сформировать типологию проектов ракетно-космического предприятия;

– определить понятие «инновационная готовность системы управления персоналом проектно-ориентированного предприятия»;

– сформировать декомпозицию уровней инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов;

– описать характеристику структурной, функциональной и информационной готовности системы управления персоналом к собственным проектам, а также к основным и вспомогательным производственным проектам космического предприятия на примере ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева»;

– определить основные параметры модели оценки уровня инновационной готовности системы управления персоналом к проектной деятельности.

Научно-производственный потенциал отечественной ракетно-космической промышленности составляют 22 промышленных предприятия, 59 научно-производственных объединений, центров, НИИ, КБ [2].

Современные ракетно-космические предприятия относятся к типу проектно-ориентированных структур [3]. Управление здесь направлено как на независимые проекты создания и эксплуатационной поддержки космических систем, так и на портфели комплексно-связанных серийных проектов. Проектная ориентация управления ракетно-космическими предприятиям предполагает:

– дифференциацию заказчиков продукции по требованиям к функциональным, качественным, стоимостным и временным характеристикам космических систем;

– уникальные требования к жизненному циклу космических систем;

– жесткие стоимостные и временные ограничения производственно-эксплуатационного цикла;

– уникальность ресурсов для создания космических систем;

– требования одновременного выполнения на предприятии большого числа уникальных высокотехнологичных заказов.

На макроуровне управление проектами ракетно-космических предприятий как в России, так и за рубежом регулируется государственной политикой, национальными государственными космическими программами [4].

«Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу» (утверждены Президентом РФ от 19.04.2013 г. № Пр-906), Государственная программа «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы» (распоряжение Правительства РФ № 2594-р от 28.12.2012 г.) определяют цели и задачи ракетно-космической промышленности, целевые индикаторы и показатели реализации космической деятельности страны в указанные периоды [4].

В данных документах зафиксированы три приоритета. Первый – обеспечение гарантированного доступа России в космос, развитие и использование космической техники, технологии и услуг в интересах социально-экономической сферы, а также развитие ракетно-космической промышленности и выполнение международных обязательств. Второй приоритет – создание космических средств в интересах удовлетворения потребностей науки. Третий – пилотируемые полеты и космодромы. В ближайшее время будут разработаны концепции двух федеральных целевых программ: Федеральной космической программы на 2016–2025 годы и Федеральной целевой программы развития российских космодромов на 2016–2025 годы. Эта определенность дает возможность спланировать продолжение и завершение проектов, которые начаты, но не заканчиваются в 2015 г. согласно действующей ФКП [5].

Таким образом, успешные отечественные предприятия, занимающие лидирующее положение на мировом рынке космических систем, получают возможность разработки стратегических программ, обеспечивающих устойчивое долгосрочное развитие. Необходимым условием сохранения и роста конкурентоспособности в будущем является инновационная готовность всех систем управления к реализации высокотехнологичных проектов, составляющих стратегическую программу ракетно-космического предприятия. Очевидно, что инновационная готовность предприятия может быть достигнута за счет полноценного развертывания технологий проектного управления [6; 7].

Производственные и управленческие особенности ракетно-космического предприятия определяют необходимость укрупненного разделения его проектов на две группы:

– основные проекты разработки, производства и эксплуатации космических летательных аппаратов и систем;

– вспомогательные проекты (логистические, информационные, кадровые, PR, маркетинговые, коммуникационные и т. д.) [6].

Главным ценностным активом при реализации проектов ракетно-космического предприятия являются сотрудники и руководители компании, внешние эксперты, которые за счет уникального опыта и возможностей обеспечивают достижение проектного результата. В свою очередь, уровень развития системы управления персоналом определяет эффективность управления командами проектов.

Примером успешной реализации подобного подхода является интеграция проектных функций в деятельность по управлению персоналом в ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» – ведущем предприятии России, мировом лидере в области разработки и изготовления космических комплексов связи, телевещания, ретрансляции, навигации и геодезии. ОАО «ИСС» – единственное российское предприятие, изготавливающее навигационные спутники. На данный момент в мире всего две полноценные глобальные навигационные системы: российский ГЛОНАСС и американская GPS. И к этому только идут европейская «Галилео»

и китайская «Бэйдоу». 75 % всех запусков, осуществляемых в России – это спутники, созданные ОАО «ИСС». Помимо собственно космических аппаратов компания «ИСС» занимается поставкой отдельных их конструкций и систем по заказу других предприятий. В частности, НПО имени С. А. Лавочкина поставляются солнечные батареи и их электромеханические приводы. Кроме того, РКК «Энергия» пригласила ОАО «ИСС» поучаствовать в строительстве научно-энергетического модуля для МКС в части производства солнечных батарей и механических блоков для их вращения.

В сотрудничестве с французской компанией Thales Alenia Space предприятие уже приняло участие более чем в 20 российских и зарубежных космических проектах. В том числе по восполнению российской орбитальной группировки спутниками связи серий «Экспресс-А», «Экспресс-АМ» и «Экспресс-АТ». Помимо Thales Alenia Space железногорцы успешно выполняют проекты и со многими другими зарубежными партнерами, среди которых французские компании Sodern, Saft и Axon Cable, японская NEC Toshiba Space Systems, европейская RUAG, немецкая Jena-Optronik и другие ведущие компании мира [8].

Инновационная готовность системы управления персоналом проектно-ориентированного предприятия – достигнутый структурно-организационный, функциональный, компетентностный потенциал системы управления персоналом, обеспечивающий разработку, апробацию и масштабирование новшеств, целевую результативность проектов предприятия.

Декомпозиция уровней инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов аэрокосмического предприятия представлена на рис. 1.

Собственные проекты системы управления персоналом носят характер start-up проектов и в целом обеспечивают внедрение кадровых новшеств в деятельность предприятия. Дальнейшая реализация новшеств в случае, если внедрение успешно, осуществляется путем процессной кадровой поддержки основных производственных проектов предприятия [9].

В таблице приводится характеристика инновационной готовности системы управления персоналом в условиях проектного управления на ракетно-космическом предприятии.

Модель оценки уровня инновационной готовности должна включать оценку качества процессов кадрового сопровождения основных производственных и прочих проектов предприятия, а также оценку качества собственных проектов, реализуемых службой управления персоналом с точки зрения структурной, функциональной и информационной готовности [15] (рис. 2).

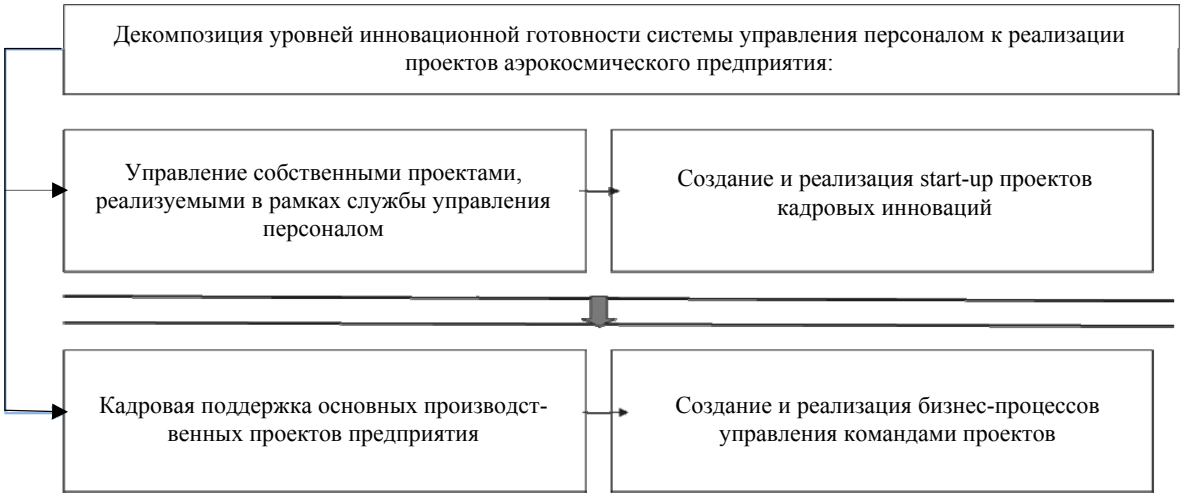


Рис. 1. Декомпозиция уровней инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов аэрокосмического предприятия

Характеристика инновационной готовности системы управления персоналом в условиях проектного управления [10–14]

Параметры инновационной готовности	Собственные проекты, реализуемые службой управления персоналом	Основные производственные проекты предприятия, прочие вспомогательные проекты
Структурная готовность	Создание в структуре службы управления персоналом: – группы организационного проектирования; – центра кадровых проектных компетенций Создание на предприятии института уполномоченных по персоналу (статус уполномоченных присваивается сотрудникам цехов и отделов по результатам специального отбора)	Включение представителя службы управления персоналом в состав Научно-технического совета предприятия (обеспечение возможности компетентной персонал-поддержки проекта на предконтрактной стадии)

Окончание таблицы

Параметры инновационной готовности	Собственные проекты, реализуемые службой управления персоналом	Основные производственные проекты предприятия, прочие вспомогательные проекты
Функциональная готовность	Управление профориентационными, диагностическими, аналитическими проектами, event-проекты, проекты формирования лояльности (внешней и внутренней), проекты внутреннего консалтинга (обмен проектными технологиями через внутреннее обучение и консалтинг)	Бизнес-процессы отбора, оценки, мотивации участников команд проектов Привлечение в проекты специалистов из внешних структур на условиях гибких режимов занятости Технологии расстановки и замещения сотрудников при реализации проектов
Информационная готовность	Создание и актуализация базы знаний по кадровым проектам Наличие компетенций по управлению проектами у специалистов службы управления персоналом Применение информационной системы управления проектами, интегрированной с кадровыми программами в единой информационной среде предприятия (с учетом защиты персональной информации)	Наличие модели проектных компетенций специалистов Актуальная база маркетинга проектных компетенций (данные о специалистах предприятия, представителях внешних структур, обладающих проектными компетенциями)

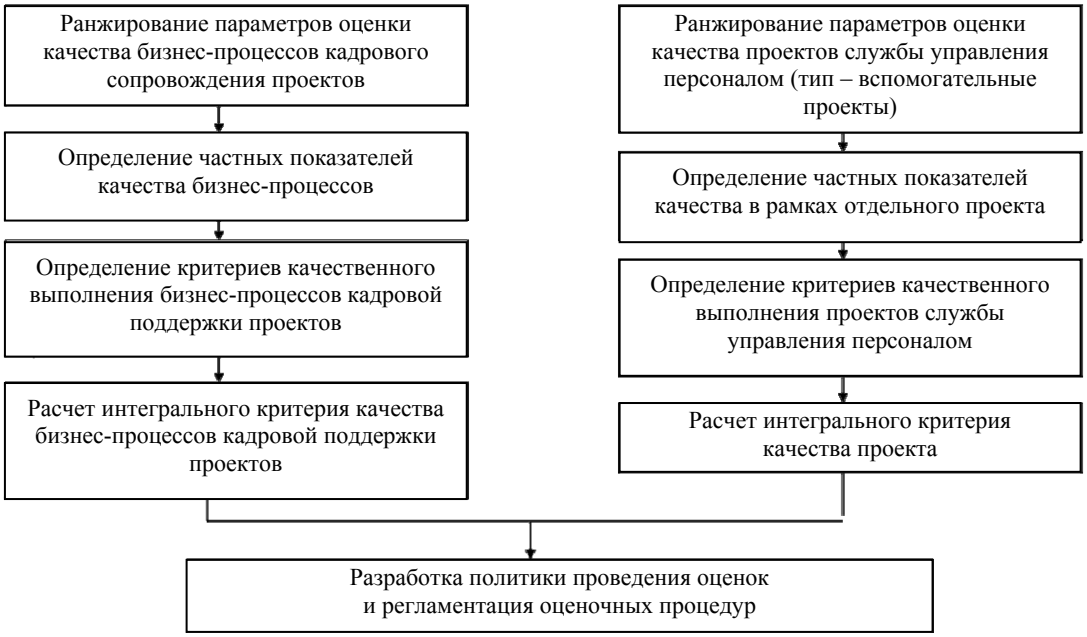


Рис. 2. Модель оценки уровня инновационной готовности системы управления персоналом к реализации проектов аэрокосмического предприятия

В заключение отметим, что реализация проектного подхода к управлению персоналом с использованием данных инструментов возможна в случае полноценного развертывания системы и стандартов управления проектами на предприятии.

Библиографические ссылки

1. Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу [Электронный ресурс]. URL: http://www.aex.ru/docs/8/2012/4/27/1561/ (дата обращения: 20.04.2014).

2. Ерыгина Л. В., Сердюк Р. С. Состояние российской ракетно-космической промышленности и тенденции её развития // Вестник СибГАУ. 2014. № 1(53). С. 207–211.

3. Ромашов А. В., Баранов В. В. Стратегии развития научно-производственных предприятий аэрокосмического комплекса: Инновационный путь. М. : Альпина паблишерс, 2009, 215 с.

4. Афанасьев И. Г. Космическая деятельность России на период 2013–2020 годы [Электронный ресурс]. URL: http://novosti-kosmonavtiki.ru/mag/2014/1239/20821/ (дата обращения: 25.04.2014).

5. Государственная программа Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы» [Электронный ресурс]. URL: http://www.federalspace.ru/20561/ (дата обращения: 11.05.2014).

6. Ньютон Р. Управление проектами от А до Я. М. : Альпина паблишерс, 2007. 130 с.

7. Руководство к своду знаний по управлению проектами. 5-е изд. Project Management Institute Inc. [Электронный ресурс]. URL: http://www.pmdoc.ru/?tag=pmbok (дата обращения: 18.06.2014).

8. Красильников А. ОАО «ИСС»: настоящее и будущее [Электронный ресурс]. URL: http://novosti-kosmonavtiki.ru/mag/2014/1239/20821/ (дата обращения: 14.06.2014).

9. Кибанов А. Я. [и др.]. Управление инновациями в кадровой работе. М. : Проспект, 2011. 64 с.

10. Армстронг М. Стратегическое управление человеческими ресурсами. М. : Инфра-М, 2002, 328 с.

11. Кибанов А. Я. Управление персоналом организации. М. : Инфра-М, 2005, 638 с.

12. Мелихов Ю. Е. Управление персоналом: портфель надежных технологий. М. : Дашков и К°, 2011. 344 с.

13. Кибанов А. Я., Ивановская Л. В. Кадровая политика и стратегия управления персоналом. М. : Проспект, 2011. 64 с.

14. Пугачев В. П. Планирование персонала организации. М. : Изд-во Московского ун-та, 2011. 236 с.

15. Бутцева Г. С., Горшков В. А. Влияние кадровых решений на эффективность управления предприятиями // Управление персоналом. 2008. № 10. С. 29–34.

References

1. *Strategia pazvitia kosmicheskoi deyatelnosti Rossii do 2030 goda I na dalneishuu perspektivu* [The strategy of Russian space activity development until 2030 year and for long-term outlook]. (In Russ). Available at: http://www.aex.ru/docs/8/2012/4/27/1561/. (accessed: 20.04.2014).

2. Erigina L. V., Serduk R. S. [Condition of the Russian rocket and space industry and its development trends]. *Vestik SibGAU*. 2014, vol. 53, no 4, p. 207–211. (In Russ.)

3. Romashov A. V., Baranov V. V. *Strategii razvitia nauchno-proizvodstvennih predpriyatii aerokosmocheskogo kompleksa: Innovatsionnii put* [Development strategies of scientific and industrial enterprises of aerospace complex: Innovative route]. Moscow, Alpina publ., 2009, 215 p.

4. Afanasiev I. G. *Kosmicheskaya deyatelnost Rossii na period 2013–2020 godi* [Russian space activities for the period 2013-2020 years]. (In Russ). Available at: http://novosti-kosmonavtiki.ru/mag/2014/1239/20821/. (accessed 25.04.2014).

5. *Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii "Kosmicheskaya deyatel'nost' Rossii na 2013–2020 gody"* [State program of the Russian Federation "Space activity of Russia for 2013 - 2020"]. (In Russ.) Available at: http://www.federalspace.ru/20561/. (accessed 11.05.2014).

6. Newton R. *Upravlenie proectami ot A do Ya* [Project management from A to Z]. Moscow, Alpina publ., 2007, 215 p.

7. *Rukovodstvo k svodu znaniy po upravleniyu proektami* [The management to the arch of knowledge of management of projects]. (In Russ.) Available at: http://www.pmdoc.ru/?tag=pmbok. (accessed 18.06.2014).

8. Krasilnikov A. *OAO "ISS": nastoyashee I budushee* [JSC "ISS": present and future]. (In Russ.). Available at: http://novosti-kosmonavtiki.ru/mag/2014/1239/20821/. accessed: 14.06.2014).

9. Kibanov A. Y., Lukianova T. V., Yartseva S. I. *Upravlenie innovatsiami v kadrovoi rabote* [Innovation management at stuff work]. Moscow. Prospect Publ., 2011, 64 p.

10. Armstrong M. *Strategicheskoye upravlenie chelovecheskimi resoursami* [Strategic human resources management]. Moscow, IFRA-M Publ., 2002, 328 p.

11. Kibanov A. Y. *Upravlenie personalom organozatsii* [Personnel organization management]. Moscow, INFRA-M Publ., 2005, 638 p.

12. Melihov U. E. *Upravlenie personalom: portfel nadegnih tehnologii* [Personnel management: the portfolio of sure technologies]. Moscow, Dashkov i K° Publ., 2011, 344 p.

13. Kibanov A. Y., Ivanovskaya L. V. *Kadrovaya politika i strategia upravlenia personalom* [Personnel policy and personnel management strategy]. Moscow. Prospect Publ., 2011, 64 p.

14. Pugachev V. P. *Planirovanie personala organizatsii* [Personnel planning of organization]. Moscow. Moscow University Publ., 2011, 236 p.

15. Butseva G. S., Gorshkov V. A. [Personnel decision's influence at the efficiency of enterprises management] *Upravlenie personalom*. 2008, no 10, p. 29–34. (In Russ.)

© Кукушкин С. Г., Подвербных У. С., Самохвалова С. М., 2014.

УДК 330.111.4

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 245–249

О НАУЧНОМ ОБОСНОВАНИИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Е. А. Носачевская[1], В. В. Климук[2]

[1]Московский государственный гуманитарный университет им. М. А. Шолохова
Российская Федерация, 109240, г. Москва, ул. Верхняя Радищевская, д. 16–18
[2]Балтийский федеральный университет им. И. Канта
Российская Федерация, 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14
E-mail: klim-w11@rambler.ru; 08082007@mail.ru

Приведен анализ действующих методик оценки эффективности использования ресурсов субъекта РФ – Калининградской области. На основе разнообразных мнений ученых была выполнена характеристика региональных ресурсов с выделением соответствующих групп в графическом виде (материальные, трудовые, финансовые, экологические, интеллектуальные ресурсы). Авторами предложена методика оценки интегральной эффективности региона с выделением материальной, трудовой, финансовой, экологической, интеллектуальной составляющих. Предложен математический аппарат для расчета каждого из данных уровней эффективности. Проведена апробация предложенной методики на примере эксклавного региона России – Калининградской области. На основе статистических данных за 2009–2013 гг. выполнены расчёты частных и интегрального уровней эффективности с графическим отражением полученных результатов.

Ключевые слова: эффективность, региональные ресурсы, методика, развитие.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 245–249

ON THE SCIENTIFIC BASIS LEVEL ASSESSMENT EFFECTIVENESS REGIONAL RESOURCES

E. A. Nosachevckaya[1], V. V. Klimuk[2]

[1]Moscow State Humanitarian University M. A. Sholokhov
16–18,Verhnyaya Radishchevskaya St., Moscow, 109240, Russian Federation
[2]Baltic Federal University Kant
14a, Nevskogo St., Kaliningrad, Russian Federation
E-mail: klim-w11@rambler.ru; 08082007@mail.ru

The authors provide an analysis of existing methods of evaluating the effectiveness of the use of resources of the subject of the Russian Federation - Kaliningrad region. On the basis of the diverse opinions of scientists the characterization of regional resources with the release of the corresponding groups in graphical form (material, labor, financial, environmental, intellectual resources) was carried out. Each group consists of 4–5 main categories, characterizing them and used as indicators of effective use. The authors proposed a method of estimating the integral efficiency of the region with the release of material, labor, financial, environmental, intellectual components. Calculation of individual (private) efficiency allows to identify the most and least vulnerable aspects of the functioning of the region, to determine the main directions of influence to improve the efficiency of the whole region (country). Complex (integrated) is used to determine the effectiveness of management (economical) use of resources of all kinds in the whole investigated region (country). A mathematical apparatus for calculating each of the private and integral levels of efficiency. Tools for assessing the effectiveness of private levels are based on the use of relative performance (index change). To calculate the integral level of resource efficiency in the region used the geometric mean value that most accurately reflects the total (complex) change of regional resources for the study period. The approbation of the proposed methodology on the example of Russian exclave region – Kaliningrad region. Based on the statistical data of 2009–2013, the calculation was made on private and integral performance levels with a graphic reflection of the results. As a result, in terms of material, labor, environmental efficiency region recorded performance level close to unity. Intellectual efficiency observed the highest level of differentiation of the calculated values. In general, the integral level of resource efficiency of Kaliningrad region ranged from 0.5 in the 2009–2010 crisis and to 1.2 in 2012.

Keywords: efficiency, regional resources, methodology, development.

На протяжении последних десятилетий исследование проблематики эффективности использования различных ресурсов на региональном уровне становится все более актуальным. Однако сложившиеся представления о результативности влияния тех или иных факторов на развитие экономических процессов требуют уточнения с целью более объективной оценки эффективности использования региональных ресурсов. Предметом исследования выступают региональные ресурсы и методические подходы к оценке эффективности их использования. В качестве объекта исследуется эксклавный регион Российской Федерации – Калининградская область. Целью работы является разработка методического инструментария по оценке интегрального уровня эффективности использования региональных ресурсов и её частных (составляющих) элементов.

В исследованиях зарубежных авторов К. Р. Макконела и С. Л. Брю понятие эффективности производства сформулировано следующим образом: «Мы хотим получить максимальную отдачу при минимуме издержек от имеющихся ограниченных производственных ресурсов» [1].

П. Хэйне определяет эффективность как «соотношение ценности результата и ценности затрат» [2]. В некоторых научных изданиях используются различные подходы к оценке эффектов и эффективности в целом [3].

Труды российского экономиста О. С. Сухарева посвящены изучению проблем эффективности экономики и разработке теории институциональной эффективности. Ученый в своих исследованиях развивает представления о синергетической эффективности, разрабатывает экономико-математические модели эффективности функционирования хозяйственных систем и институтов [4].

Отечественный ученый В. И. Выборнов предложил наряду с традиционными показателями эффективности использовать следующие: период смены ассортимента продукции и технологии производства, снижение себестоимости по мере появления новых образцов. Научный анализ эффективности проведен профессором Л. Н. Нехорошевой. По мнению ученого, «современные подходы к оценке эффективности требуют определения не только уровня эффективности используемых ресурсов, но и показателей, характеризующих текущие денежные потоки (финансовые показатели), а также способность привлечь денежные потоки в будущем» [5].

Мнения различных ученых позволили авторам уточнить содержание эффективности использования региональных ресурсов и предложить дифференциацию ресурсов, выделив соответствующие группы (рис. 1).

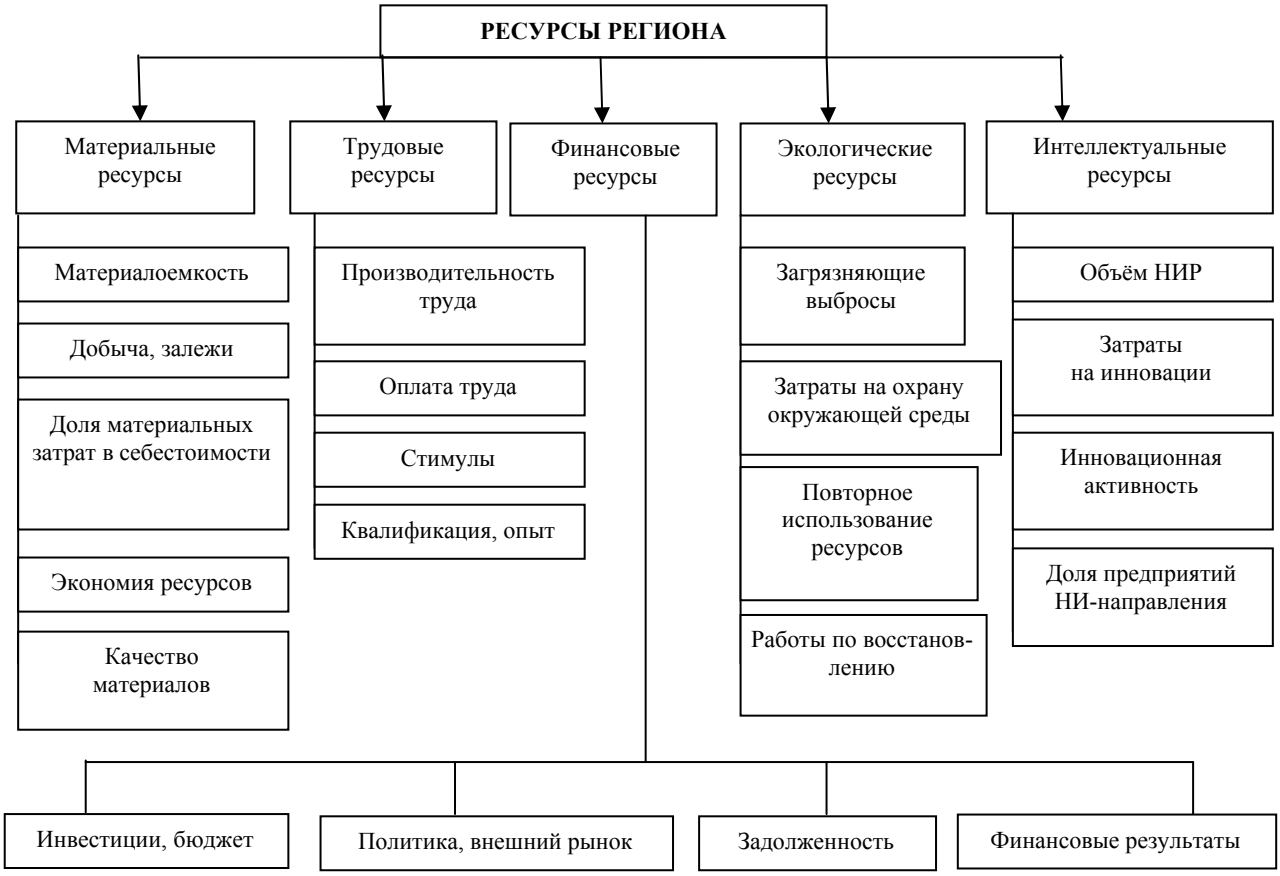


Рис. 1. Характеристика региональных ресурсов с выделением соответствующих групп

Характеристика региональных ресурсов учитывает направления социально-экономического развития той или иной территории.

Методики оценки интегрального уровня эффективности использования ресурсов региона предложены в том числе отечественными учёными А. А. Кисуркиным, Т. Н. Плотниковой. Данные методики основаны на расчете уровня валового регионального дохода и затрат на экономические ресурсы [6].

Отечественным ученым С. Н. Растворцевой предложена методика оценки социально-экономической эффективности [7].

Российским исследователем В. В. Смирновым разработана методика оценки эффективности использования региональных ресурсов на основе стратегий социально-экономического развития регионов и рассмотрения донорной и акцепторной подсистем регионального развития [8].

Отечественным ученым И. Г. Пивень предложена методика оценки эффективности региональных ресурсов путем учета социальных, экономических показателей, инвестиций, инноваций и финансов, на основе весовых и корректировочных коэффициентов [9].

Однако, на наш взгляд, предлагаемые методики требуют совершенствования, в том числе в части уделения большего внимания вопросам формирования приоритетных направлений развития экономики на региональном уровне.

В связи с этим авторами предложена методика оценки интегрального уровня эффективности использования региональных ресурсов, основанная на оценке составных уровней эффективности и расчете ее интегрального значения по региону.

Для интегральной оценки эффективности использования региональных ресурсов следует учитывать каждую группу ресурсов (формула (1)):

$$РЭ_{инт} = sqrt(5; М_э \cdot Т_э \cdot Ф_э \cdot Э_э \cdot И_э), \quad (1)$$

где $РЭ_{инт}$ – интегральная оценка региональной эффективности; $М_э$ – материальная эффективность; $Т_э$ – трудовая эффективность; $Ф_э$ – финансовая эффективность; $Э_э$ – экологическая эффективность; $И_э$ – интеллектуальная эффективность.

Эффективность использования региональных ресурсов формируется на основе ее составных элементов. В рамках данного исследования предложены следующие алгоритмы их расчетов.

Материальная эффективность ($М_э$) определена исходя из отношения индекса изменения валового регионального продукта к индексу изменения материальных затрат региона:

$$М_э = (ВРП_ф : ВРП_б) / (МЗ_ф : МЗ_б) = И_{ВРП} / И_{МЗ}, \quad (2)$$

где $ВРП_{ф,б}$ – валовой региональный продукт фактический и в предыдущем (базовом, сравниваемом) периоде соответственно; $МЗ_{ф,б}$ – уровень материальных затрат региона фактический и в предыдущем (базовом, сравниваемом) периоде соответственно; $И_{ВРП}$ – индекс изменения валового регионального продукта; $И_{МЗ}$ – индекс изменения материальных затрат.

В результате получен критерий результативности, положительно характеризующий изучаемый вид ресурсов.

Трудовую эффективность ($Т_э$) предлагается определять как отношение индексов изменения производительности и оплаты труда по региону:

$$Т_э = (ПТ_ф : ПТ_б) / (ОТ_ф : ОТ_б) = И_{ПТ} / И_{ОТ}, \quad (3)$$

где $ПТ_{ф,б}$ – производительность труда по региону фактическая и в базовом периоде соответственно; $ОТ_{ф,б}$ – оплата труда по региону фактическая и в базовом периоде соответственно; $И_{ПТ}$ – индекс изменения производительности труда; $И_{ОТ}$ – индекс изменения оплаты труда.

Сопоставление интенсивности трудовых ресурсов и их вознаграждения по темпам изменения позволит отразить результативность данной категории ресурсов и оценить тенденцию их развития.

Финансовую эффективность ($Ф_э$) предложено оценивать как относительный показатель изменения прибыли организаций региона и его кредиторской задолженности:

$$Ф_э = (ПР_ф : ПР_б) / (КЗ_ф : КЗ_б) = И_{ПР} / И_{КЗ}, \quad (4)$$

где $ПР_{ф,б}$ – прибыль организаций региона фактическая и в базовом периоде соответственно; $КЗ_{ф,б}$ – кредиторская задолженность региона фактическая и в базовом периоде соответственно; $И_{ПР}$ – индекс изменения прибыли организаций; $И_{КЗ}$ – индекс изменения кредиторской задолженности.

Сравнение темпов изменения финансового результата организаций региона и его задолженности позволит, по нашему мнению, оценить уровень результативности используемых финансовых ресурсов для развития организаций.

Для оценки экологической эффективности ($Э_э$) предложено сопоставление темпов изменения выбросов загрязняющих веществ в целом по региону и затрат на охрану окружающей среды данного региона:

$$Э_э = (ЗВ_б : ЗВ_ф) / (ООС_ф : ООС_б) = И_{ЗВ} / И_{ООС}, \quad (5)$$

где $ЗВ_{ф,б}$ – выбросы загрязняющих веществ фактические и в базовом периоде соответственно; $ООС_{ф,б}$ – затраты региона на охрану окружающей среды фактические и в базовом периоде соответственно; $И_{ЗВ}$ – индекс изменения объемов выбросов загрязняющих веществ; $И_{ООС}$ – индекс изменения затрат на охрану окружающей среды.

Сопоставлением темпов снижения (увеличения) объемов выбросов и затрат на улучшение состояния окружающей среды можно оценить эффективность экологических ресурсов региона.

Интеллектуальную эффективность ($И_э$) предложено определять как отношение темпов изменения объема научно-исследовательских работ (произведенных инновационных товаров, работ, услуг) и затрат на их осуществление по региону:

$$И_э = (НИР_ф : НИР_б) / (З_ф : З_б) = И_{НИР} / И_З, \quad (6)$$

где $НИР_{ф,б}$ – объем выполненных научно-исследовательских работ (произведенных инновационных товаров, работ, услуг) по региону фактический

и в базовом периоде соответственно; $З_{ф,б}$ – уровень затрат на научно-исследовательские работы по региону фактический и в базовом периоде соответственно; $И_{НИР}$ – индекс изменения объема научно-исследовательских работ; $И_З$ – индекс изменения затрат на научно-исследовательские работы.

По мнению авторов, сравнением темпов изменения объемов научно-исследовательских работ (произведенной инновационной продукции, работ, услуг) и темпов изменения затрат на их достижение можно определить уровень эффективности использования интеллектуальных ресурсов.

Предложенная методика поэтапной оценки каждого вида эффективности и последующая оценка интегральной региональной эффективности использования региональных ресурсов позволяет определить комплексный показатель уровня использования ресурсов региона, проследить динамику за исследуемый временной период, выявить резервы роста эффективности, приоритетные направления воздействия на улучшение регионального ресурсопользования.

В рамках исследования проведена апробация предложенной методики на примере эксклавного региона Российской Федерации – Калининградской области (рис. 2).

Полученные результаты расчётов показывают, что по материальной, трудовой, экологической эффективности зафиксирован уровень результативности, близкий к единице. По интеллектуальной эффективности наблюдается наибольший уровень дифференциации расчётных значений. По уровню финансовой эффективности отмечена отрицательная тенденция в исследуемом временном периоде. Существенный разброс значений уровней интеллектуальной и финансовой эффективности свидетельствует о постепенно возникающих барьерах в отношении финансирования реализуемых проектов, программ, влияющих на эффективность использования данных видов ресурсов. На рынке труда и сырьевом рынке отмечена стабильность в эффективном использовании ресурсов, влияющая на общий уровень социально-экономического развития региона.

В целом интегральный уровень эффективности использования ресурсов Калининградской области находится в пределах от 0,5 в кризисных 2009–2010 гг. и до 1,2 в 2012 году.

Сокращение интегрального уровня эффективности использования ресурсов Калининградского региона в 2013 году до 0,8 свидетельствует о существенном воздействии каждой ее составляющей и характеризуется снижением результативности использования трудовых, экологических, финансовых, интеллектуальных ресурсов. Это, в свою очередь, может быть обусловлено изменениями в рыночной конъюнктуре, инвестиционном климате, стимулировании труда, экологическом состоянии субъекта Российской Федерации.

Таким образом, предложенная методика является универсальной, позволяет провести диагностику результативности использования ресурсов региона, выявить приоритетные направления развития экономики той или иной территории, сформировать соответствующие предложения.

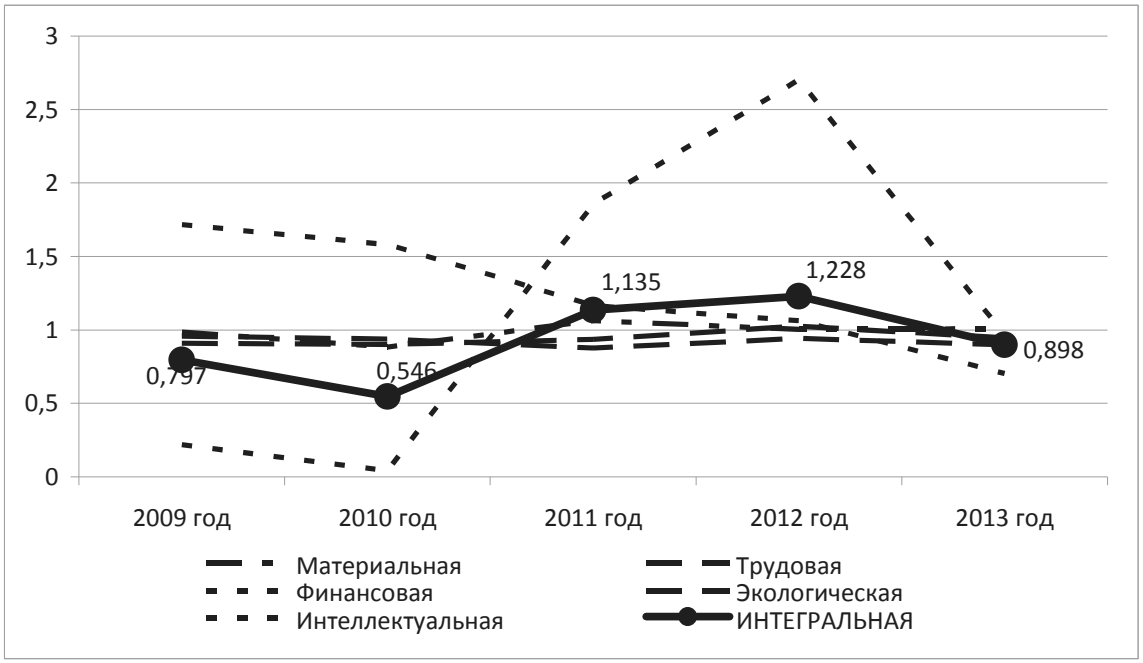


Рис. 2. Динамика уровней эффективности использования ресурсов Калининградской области за 2009–2013 гг. (на основе данных [10])

Библиографические ссылки

1. Макконнел К. Р. Экономикс: принципы, проблемы и политика. Т. 1. М. : Республика, 1999. 399 с.

2. Хэйне П. Экономический образ мышления : пер. с англ. М. : Каталаксия, 1997. 704 с.

3. Абдулкадырова М. А. Методические подходы к анализу эффективности использования производственных ресурсов регионального АПК // Terra Economicus. 2009. № 3. С. 256–260.

4. Сухарев О. С. Теория эффективности экономики : монография. М. : Финансы и статистика, 2009. 360 с.

5. Соркин С. Л. Эффективность внешнеэкономической деятельности: понятие, измерение и оценка : монография. Гродно : ГрГУ, 2011. 130 с.

6. Кисуркин А. А., Плотникова Т. Н. Методика оценки эффективности исследования региональных социально-экономических ресурсов // Современне тенденции в экономике и управлении. 2011. № 10-1. С. 148–152.

7. Растворцева С. Н. Управление социально-экономической эффективностью регионального развития : автореф. … д-ра экон. наук. СПб. 2010. 40 с.

8. Смирнов В. В. Методика оценки эффективности социально-экономического развития региона // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2007. № 2. С. 25–32.

9. Пивень И. Г. Методика оценки эффективности системы стратегического управления социально-экономическим развитием региона // Теория и практика общественного развития. 2014. № 7. С. 21–27.

10. Федеральная служба государственной статистики по Калининградской области Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://www.kaliningrad.gks.ru (дата обращения: 06.06.2014).

References

1. Makkonnel K. R. *Jekonomiks: principy, problemy i politika* [Economics: Principles, Problems and Policies]. Vol. I. Moscow, Respublika Publ., 1999, 399 p.

2. Hjejne P. *Jekonomicheskij obraz myshlenija* [Economic way of thinking]. Moscow, Katalaksija Publ., 1997, 704 p.

3. Abdulkadyrova M. A. [Methodological approaches to the analysis of the effectiveness of industrial resources of regional agriculture] *Terra Economicus*. 2009, no. 3, p. 256–260. (In Russ.)

4. Suharev O. S. *Teorija jeffektivnosti jekonomiki: monografija* [The theory of economic efficiency: Monograph]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2009, 360 p.

5. Sorkin S. L. *Jeffektivnost' vneshnejekonomicheskoj dejatel'nosti: ponjatie, izmerenie i ocenka: monografija* [Efficiency of foreign economic activity: concept, measurement and evaluation: monograph]. Grodno, GrGU Publ., 2011, 130 p.

6. Kisurkin A. A., Plotnikova T. N. [Methods of assessing the effectiveness of the study of regional social and economic resources] *Sovremenne tendencii v jekonomike i upravlenii*. 2011, no. 10-1, p. 148–152. (In Russ.)

7. Rastvorceva S. N. *Upravlenie social'no-jekonomicheskoj jeffektivnost'ju regional'nogo razvitija. Avtoref. na soisk. uch. step. d.e.n.* [Managing of socio-economic efficiency of regional development. Author. on soisk. uch. step. PhD] St. Petersburg, 2010, 40 p.

8. Smirnov V. V. [Methods of assessing the effectiveness of socio-economic development of the region] *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region.* 2007, no. 2, p. 25–32. (In Russ.)

9. Piven' I. G. [Methods of assessing the effectiveness of the strategic management of socio-economic development of the region] *Teorija i praktika obshhestvennogo razvitija*. 2014, no. 7, p. 21–27. (In Russ.)

10. *Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki po Kaliningradskoj oblasti Rossijskoj Federacii* [The Federal State Statistics Service of Kaliningrad region of the Russian Federation] (In Russ.) Available at: http://www.kaliningrad.gks.ru (accessed 6 June 2014).

© Носачевская Е. А., Климук В. В., 2014

УДК 350. 5(450+571)(07)

Вестник СибГАУ
2014. № 3(55). С. 250–258

СТРУКТУРНЫЕ СДВИГИ В СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЯХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ

Т. С. Попова

Воронежский государственный университет инженерных технологий
Российская Федерация, 394000, г. Воронеж, просп. Революции, 19
E-mail: popovatatser@yandex.ru

Показано на основании интегрального и космического мониторинга факторов, что формируемая политика конкурентоспособности промышленности России, её инновационная политика должны быть ориентированы на желаемые поля стратегического прорыва в космонавтике и ракетостроении. Экономические данные на предприятиях ракетно-космической отрасли, других отраслей в 8 федеральных округах РФ, в Сибирском ФО, Красноярском крае, 10 крупнейших регионах, включая ЦФО–ЦЧЭР, 45 ведущих предприятий, подтвердили выводы автора о том, что для обеспечения ожидаемых структурных сдвигов в современных наукоемких конкурентоспособных направлениях, достижения высокого уровня конкурентоспособности промышленности России и ее ракетно-космической отрасли в основе аналитических оценок должна находиться система критических технологий и управленческий инструментарий, получивший в мировой практике название «технологические платформы».

Ключевые слова: политика конкурентоспособности, стратегические приоритеты, аналитические оценки, критические технологии, технологические платформы, космический мониторинг.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 250–258

STRUCTURAL SHIFTS IN THE COMPETITIVE HIGH-TECH MODERN SPACE ROCKET TECHNOLOGY DIRECTIONS OF ECONOMIC SYSTEM OF RUSSIA

T. S. Popova

Voronezh State University of Engineering Technology
19, Revolution Av., Voronezh, 394000, Russian Federation
E-mail: popovatatser@yandex.ru

It is shown on the basis of integral and space monitoring factors that formed the industrial competitiveness policy of Russia, its innovation policy should focus on the desired fields strategic breakthrough in space and rocket, which is possible to achieve or exceed the global technological level. Russian economy is inferior to the level of innovation activity of the global community with a competitive industry. Its innovative activity is directly dependent on the size of the enterprise. Russian industrial enterprises the share of non-technological innovation is low, lagging behind the European countries. Economic data in enterprises space industry and other sectors in eight federal districts of Russia, in the Siberian Federal District, Krasnoyarsk Territory, the top 10 regions, including CFD-TSCHER, 45 leading enterprises, the author's conclusions confirmed that for the expected structural changes in modern high competitive areas, achieving a high level of competitiveness of the space industry in the basis of analytical estimates should be of critical technologies and system management tool that gets in the world called "Technology Platforms". The author shows that there is a need to develop an integrated management approach and a corresponding innovative tools that allow a single system to consider the priorities of different levels and the scale and stage of the innovation cycle of both the state and business. According to analytical estimates by the author in the structure of the total profits of enterprises of extractive industries priority belongs to the production of energy minerals. Reveals the author's scientific and practical approach, methodology and applications of modern tools in relation to the competitiveness of Russian policy in the industry as a whole, and astronautics, rocketry particularly conducive to modernity demanded structural changes, allowing an economic point of view on the proposed criteria in the comparative analytical characteristics of these critical technologies with Russian technology platforms and technology initiatives of the international community with a high level of competitiveness of the rocket and space industry and economic system of the country as a whole. New versions of the management of the modern knowledge-based competitive technological areas, such as in aerospace industry, and structural changes in them will require the development of new methodologies and tools to solve actual fundamental economic problems.

Keywords: politics competitiveness, strategic priorities, analytical evaluation, critical technologies, technology platforms, space monitoring.

При формировании политики конкурентоспособности промышленности России и ее ракетно-космической отрасли методология управленческих воздействий при обосновании решений проблем инновационного развития программными методами на федеральном и региональном уровнях должна учитывать приоритеты и цели социально-экономического развития России, направления структурной и научно-технической политики, прогнозы развития общегосударственных потребностей и финансовых ресурсов, результаты анализа экономического, социального и экологического состояния страны, внешнеполитические и внешнеэкономические условия, а также международные договоренности, в том числе в области совместных технологических инициатив.

Автор исходит из понимания, что инновационная национальная политика, обеспечивающая структурные сдвиги в наукоемких конкурентоспособных технологических направлениях экономической системы РФ, должна иметь избирательный характер, ориентированный на узкие поля стратегического прорыва, по которым возможно достижение или превышение мирового технологического уровня на основе активизации интеллектуальной составляющей инновационного потенциала персонала с продвинутыми профессиональными компетенциями концентрации основной части ограниченных материальных, финансовых, организационных и других ресурсов на стратегических приоритетах отраслей промышленности с учетом «поля интересов» госслужбы.

По оценкам аналитиков-экспертов для модернизации российской промышленности в ближайшие 5 лет требуется 100–200 млрд долл., которые распределятся по всем 89 субъектам РФ, ее 49 областям и более 3000 городам, 8 федеральным округам России и 10 крупнейшим ее регионам, в том числе в Сибирском ФО, в Красноярском крае [1].

Автором изучены фактические данные по состоянию дел на предприятиях отраслей промышленности России в этих 8 федеральных округах и 10 крупнейших ее регионах, на предприятиях ракетно-космической отрасли, в том числе представляющие научный и практический интерес данные по Центральному федеральному округу (ЦФО–ЦЧЭР). По решению Совета промышленников и предпринимателей Воронежской области при поддержке Торгово-промышленной палаты РФ было проведено исследование 45 ведущих организаций Воронежской области из различных областей, включая предприятия наукоемкой промышленности, сферы информационных технологий, инновационной сферы и др. [2].

Среди источников, подтверждающих выводы автора по проблеме, упоминаются ниже интересные в авторском понимании научные позиции и взгляды Б. М. Смитиенко, Д. А. Медведева, Н. А. Миклашевской, В. В. Путина, А. В. Сидоровича, Р. Гринберга, Д. А. Ендовицкого, С. Т. Антипова, А. Н. Букреева, Е. Ясина, Р. Н. Нуреева, О. Бруковской, Н. Осовицкой, Ю. В. Вертаковой, Е. С. Симоненко, Н. Е. Чередниковой, В. А. Якимович, Е. И. Мазилкиной, Т. Г. Паничкиной, М. Л. Кричевского, Л. В. Оболенской и др.

В традиционном подходе управление инновационно-технологическими приоритетами стратегического значения – это сфера ответственности государства. В альтернативном подходе предлагается модель разделения ответственности между государством и бизнесом, сущность которой сводится к разграничению сфер управления в соответствии со спецификой зон ответственности, к выбору ключевых ориентиров для создания зоны стратегической ответственности бизнеса, к созданию благоприятных условий во внешней среде.

Опыт наиболее развитых стран мирового сообщества показывает, что в основе исследований в таких случаях находится модифицированная система критических технологий и управленческий инструментарий национальной инновационной системы, получивший название «технологические платформы». Так, в европейских и других странах в современных условиях насчитывается 36 технологических платформ, в России – 32 платформы, обеспечивающие развитие современных наукоемких конкурентоспособных ракетно-космических технологических направлений экономической системы России, ее промышленности. Далее автором приводятся экономические данные, характеризующие фактические результаты развития национальной экономики с использованием этого инновационного управленческого инструментария.

Автор выявил, что по аналитическим данным Центра анализа данных Высшей школы экономики по итогам трех кварталов 2013 г. доходы федерального бюджета сложились в сумме 9604,5 млрд руб., или 19,7 % ВВП. По сравнению с аналогичным периодом прошлого года поступления в федеральный бюджет увеличились на 2,3 %, что с поправкой на темпы инфляции означает 96,5 % предыдущего года в реальном исчислении.

По итогам трех кварталов анализируемого периода расходы федерального бюджета были профинансированы на 66,5 % от утвержденных бюджетных назначений на этот год. Исполнение различных разделов федерального бюджета варьируется от 73,4 % по межбюджетным трансфертам общего назначения и 73,5 % по расходам на обслуживание государственного долга до 52,0 % по расходам на транспорт в составе расходов на национальную экономику.

В целом же по всему разделу расходы на национальную экономику были профинансированы на 56,5 % от годовых значений. Расходы на национальную безопасность и правоохранительную деятельность по итогам девяти месяцев этого года были профинансированы на 64,8 %, расходы на национальную оборону – на 66,6 %, а расходы на социально-культурные мероприятия – на 70,7 %.

По итогам первых девяти месяцев анализируемого периода федеральный бюджет был исполнен с профицитом в размере 652,9 млрд руб. (1,3 % ВВП).

Автор показывает, что в течение первых четырех месяцев федеральный бюджет сводился с дефицитом.

Размеры Резервного фонда по состоянию на 1 октября 2013 г. составили 2795,8 млрд руб. и сократились за месяц на 1,5 %. Размеры Фонда национального благосостояния на эту же дату составили 2847,4 млрд руб. и сократились на 1,3 % [3].

В таблице представлены основные показатели, характеризующие ракетно-космическую отрасль в общей характеристике показателей развития экономики РФ.

Изученный опыт разработки и реализации современных наукоемких конкурентоспособных ракетно-космических технологических направлений в экономической системе России показал, что управление системой инновационных приоритетов и структурных сдвигов с учетом опыта реализации технологических платформ стран мирового сообщества с высоким уровнем конкурентоспособности промышленности осуществляется на основе совокупности стратегических альянсов и что главными характеристиками платформ являются следующие: объект управления платформ – приоритетная инновационная задача стратегического уровня; назначение платформ – предоставление организационного механизма для выбора и решения задачи стратегического уровня; специфика и диапазон управляющих воздействий – разработка новых технологий, нетехнологический инструментарий; лидерство–промышленность; база потенциальных участников – бизнес, государство, инвесторы, наука, потребители, общественные организации; ключевой мотивационный драйвер – конкурентные угрозы, нарастание спроса; ключевой драйвер возможности – кооперация субъектов национальной инновационной системы; запуск процесса становления платформы – выбор приоритетной инновационной задачи, отвечающей на одну из главных конкурентных проблем обеспечения промышленности и фокусирующей интересы участников; жизненный цикл платформы – формирование организованной структуры, определение долгосрочных ориентиров, стратегическое планирование и реализация планов исследований; горизонт стратегического планирования – доконкурентная цепочка добавления стоимости, средние и долгосрочные перспективы; финансовая база – ресурсы частного сектора и государственные источники финансирования проектов (национальные, региональные и др.) [4].

Проявляющаяся особенность главных характеристик состоит в том, что они строго включают в себя разработанный инновационный методологический инструментарий стратегического планирования,
гарантию стратегической значимости инновационного приоритета и проектов – ключевую роль промышленности страны в выборе инновационных приоритетов
и проектов и ее вклад в процедуры финансирования реализации проектов, наличие круга заинтересованных хозяйствующих субъектов.

Показатели развития добывающих и обрабатывающих производств в общей характеристике показателей национальной экономики России, включая ракетно-космическую отрасль, млрд руб.*

Наименование показателя	Октябрь 2013, млрд руб.	В % к		Январь-октябрь 2013 в % к январю-октябрю 2012
		октябрю 2012	сентябрю 2013	
Добыча полезных ископаемых	**796**	**109,4**	**96,1**	**106,2**
В том числе: – добыча топливно-энергетических полезных ископаемых	699,1	111,5	96,6	106,9
– добыча полезных ископаемых, кроме топливно-энергетических	96,9	96,3	92,9	101,7
Обрабатывающие производства	**2572,6**	**104,9**	**98,9**	**105,0**
Из них: производство транспортных средств; транспорт и связь, включая авиацию, ракетно-космическую продукцию (космонавтику), судостроение	252,9	101,9	93,8	108,7
производство оборудования, производство пищевых продуктов, включая напитки и др.	375,7	103,2	105,3	106,5
текстильное и швейное производство	31,0	130,0	94,9	122,6

Окончание таблицы

Наименование показателя	Октябрь 2013, млрд руб.	В % к		Январь-октябрь 2013 в % к январю-октябрю 2012
		октябрю 2012	сентябрю 2013	
производство кожи, изделий из кожи и производство обуви	5,1	100,5	100,9	105,0
обработка древесины и производство изделий из дерева	30,8	107,5	101,9	104,3
целлюлозно-бумажное производство; издательская и полиграфическая деятельность	84,8	103,4	104,7	104,8
В том числе: – производство целлюлозы – древесной массы, бумаги – картона и изделий из них	55,8	106,8	106,4	104,8
издательская и полиграфическая деятельность, тиражирование записанных носителей информации	28,9	97,4	101,7	104,7
Производство кокса и нефтепродуктов	754,0	117,0	96,2	110,2
Химическое производство	165,7	98,5	100,6	102,7
Производство резиновых и пластмассовых изделий	61,8	92,4	97,9	101,6
Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	111,4	100,6	95,4	105,0
Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий	335,8	93,4	99,1	95,6
В том числе: – металлургическое производство	268,5	93,4	100,3	95,2
– производство готовых металлических изделий	67,4	93,4	94,9	97,6
– производство машин и оборудования	124,3	104,0	97,1	98,7
– производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования	126,1	97,2	101,7	101,3
Прочие производства	52,2	94,0	98,9	102,0

*Источник: Промышленность / науч. рук. Е. Ясин // Российская экономика: прогнозы и тенденции. 2013. № 12.

Рассматривая технологическую специализацию в современных наукоемких конкурентоспособных технологических направлениях экономической системы РФ, автор подтверждает свои выводы следующим мониторингом аналитических данных. На рисунке представлена динамика анализируемых технологических направлений РФ.

Так, рассчитанные по Л. М. Гохбергу индексы позволяют ранжировать технологические направления и оценивать происходящие сдвиги в технологической специализации страны. В течение анализируемого десятилетия ведущее место в этом отношении принадлежало разработкам в области ядерной физики – раздел 29 МПК; ферментации – 16; бурения и горного дела – 21; металлургии – 17; оружия и взрывных работ – 25. Повысились ранги ряда актуальных технологических областей – электроники и техники электрических связей – 31, лекарств и медикаментов – 5; нефти, животных и растительных масел – 15; строительства – 20; освещения, отопления – 24; электротехники – 30 и др. Вместе с тем снизился рейтинг некоторых лидировавших тематических направлений: неорганической химии – 12; здравоохранения – 4; оборудования для технологической обработки – 7. Ухудшились за рассматриваемые годы позиции в сфере технологической обработки ручными инструментами – 8; приборов и инструментов – 26, 27; двигателей и насосов – 22; машин и механизмов общего назначения – 23, причем последнее опустилось в число аутсайдеров. Понизились ранги таких передовых направлений, как транспортные средства, включая космонавтику и авиацию – 10,11, рельсовые и безрельсовые их виды, судостроение; текстиль и гибкие материалы – 18 и др.

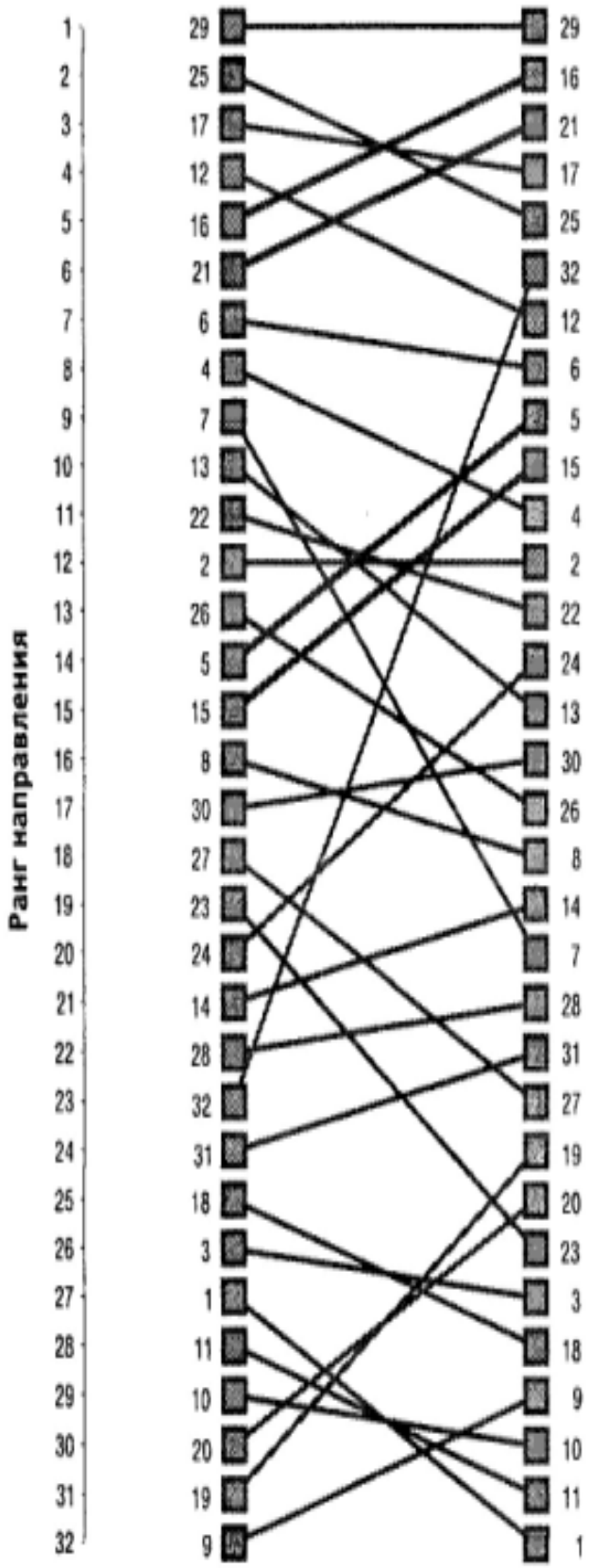
Отмеченные изменения сказались на позиционировании отдельных технологических направлений, представленных в России, относительно общемирового уровня, соответствующие единичному значению индекса технологической специализации. Автор показывает, что по данным ЕРО первые пять направлений технологической специализации России, занимая гораздо более высокие с сравнении с общемировыми позиции, не совпадают с лидирующей в мире группой технологических областей, куда входят электроника и техника электрической связи – 31; электроника – 30; здравоохранение – 4; приборы и инструменты –27, 26. Отмечается, что слабее общемирового уровня технологический потенциал России в сфере здравоохранения – 4; технологической обработки, включая шлифование, обработку древесины, пластических и стройматериалов, прессовку слоистых материалов – 8; транспортных средств и транспортировки – 10, 11; строительства – 20; машин и механизмов общего назначения – 23; приборов и техники электрической связи – 31. В меньшей мере это относится к технологиям производства предметов личного пользования – 3; машин и двигателей – 22.

В аналитических оценках показывается, что в результате на фоне мировых трендов разработки, связанные с развитием ряда важнейших технологий, в том числе в области транспортных средств, в частности судостроения, авиации и космонавтики – 10, приборов и инструментов, в том числе средств управления и вычислительной техники, средств обучения и накопления информации, акустических приборов – 27 и 28, электроники и техники электрической связи – 31, занимают достаточно низкие места в структуре технологических направлений в России.

В области высоких технологий в этот период российскими заявителями было подано в ЕРО 18 заявок, или 0,1 % общемирового потока такого рода заявок в данную международную организацию. Выявлено, что по пяти из шести выделяемых Евростатом групп высоких технологий, таких как компьютерное оборудование, лазеры, полупроводники, коммуникационные технологии, микроорганизмы и генная инженерия, удельный вес российских заявок колебался на уровне 0,1 % от общего числа заявок, поданных по наукоемким направлениям. Патентные заявки в области авиации (0,5 %) выступают как исключения. Помимо этого, число патентных заявок на изобретения в сферах био- и нанотехнологий, поданных российскими заявителями, составило соответственно 15 и 4, т. е. 8,6 и 2,2 % отечественных заявок, направляемых в ЕРО. В области ИКТ патентная активность заявителей из России в сравнении с остальными направлениями достаточно велика – 182 патентные заявки, или 21,9 % всех российских патентных заявок, поданных в ЕРО. Автор показывает, что эта доля постепенно снижается.

Автор исходит из понимания, что конкурентное преимущество – это система, обладающая какой-либо эксклюзивной ценностью, дающей ей превосходство над конкурентами в экономической, технической, организационной и других сферах деятельности. Автором систематизированы особенности структурного подхода и его роли и места в общей системе научных подходов к управлению конкурентоспособностью промышленности. В экономической литературе конкурентные преимущества часто отождествляют с возможностями более эффективно распоряжаться имеющимися ресурсами, т. е. с конкурентоспособностью. Автор считает, что такая аналогия возможна, так как смысл конкурентоспособности чаще всего понимается как способность опережать соперников в достижении поставленных коммерческих целей. Но между данными понятиями есть и причинно-следственное различие. Конкурентоспособность выражается результатом, фиксирующим наличие реально существующих конкурентных преимуществ предприятия, отрасли, региона, страны в целом, без которых определить качественно и количественно рост показателей конкурентоспособности трудно [5].

Исследуя генезис этого научного понятия, автор показывает, что экономическое направление, известное под названием меркантилизма, в целях достижения активного сальдо торгового баланса считало необходимыми введение ограничений на большую часть импорта и предоставление субсидий для собственного производства. В подтверждение полученных выводов приводится книга «Исследование о природе и причинах богатства народов» А. Смита, который подверг критике меркантилистов. Основываясь на полной либерализации экономики и могуществе рынка, он разработал теорию абсолютного преимущества, в которой утверждал, что в одном регионе могут производиться товары более эффективно, чем в другом.



Направления МПК

1. Сельское хозяйство
2. Пищевые продукты и др.
3. Предметы личного пользования и домашнего обихода
4. Здравоохранение и массовые развлечения
5. Лекарства и медикаменты
6. Разделение и смешивание
7. Технологическая обработка: машинное оборудование
8. Технологическая обработка: ручные инструменты
9. Печатное дело
10. Транспорт и ракетно-космическая отрасль промышленности
11. Транспортировка
12. Неорганическая химия
13. Органическая химия
14. Органические высокомолекулярные соединения
15. Красители, нефть, животные и растительные масла
16. Ферментация, сахар, кожи
17. Металлургия
18. Текстиль и гибкие материалы
19. Бумага
20. Строительство
21. Бурение, горное дело
22. Двигатели и насосы
23. Машины и механизмы общего назначения
24. Освещение и отопление
25. Оружие; взрывные работы
26. Приборы и инструменты: измерение, испытание, оптика
27. Приборы и инструменты: вычислительные устройства
28. Приборы и инструменты: информационные устройства
29. Ядерная физика
30. Электротехника
31. Электроника и техника электрической связи
32. Прочие

Наукоемкие конкурентоспособные ракетно-космические технологические направления экономической системы России в общей динамике рангов (на основе индекса технологической специализации России) (источник: Российский инновационный индекс / под ред. Л. М. Гохберга)

Доказывая, что, если торговля не будет ограничиваться, каждому региону выгодно специализироваться на производстве той продукции, которая обладает конкурентным преимуществом. Вследствие чего ресурсы перетекут в рентабельные отрасли, поскольку конкурировать в нерентабельных отраслях невыгодно.

Автор согласен, что абсолютные преимущества, с одной стороны, порождаются естественными факторами, особыми климатическими условиями или наличием огромных природных ресурсов, играя особую роль в сельском хозяйстве и отраслях добывающей промышленности. С другой стороны, преимущества в отраслях обрабатывающей промышленности зависят от сложившихся производственных условий, например, квалифицированной рабочей силы и совершенства технологии. Согласно этой теории конкурентным будет производство, наделенное необходимыми абсолютными преимуществами. Как известно, Д. Рикардо развил эту научную идею А. Смита, разработав теорию сравнительных преимуществ, сущность которой состоит в том, что каждая страна должна специализироваться на тех продуктах, в производстве которых она обладает наибольшей относительной эффективностью или относительно меньшими издержками. Исходя из того, что если рабочие покидают одну отрасль, то они не превращаются в безработных, а переходят в другую отрасль, более производительную.

Автор, проводя сравнительную характеристику, показывает, что используя концепцию факторов производства – экономических ресурсов, созданную французским экономистом и предпринимателем Ж.-Б. Сэем, ученые Э. Хекшер и Б. Олин обратили внимание на различную нацеленность стран основными факторами производства (трудом, землей, капиталом) и что конкурентоспособными будут те отрасли, в которых сконцентрировано большее количество подобных факторов. Эти научные взгляды продолжали свое развитие.

Так, попытку эмпирической проверки основных выводов концепции Хекшера–Олина предпринял российский ученый с мировым именем В. Леонтьев. Он пришел к выводам, что, используя модель межотраслевого баланса «затраты–выпуск», эту концепцию можно усовершенствовать. Государственная политика также способна стимулировать те отрасли, где интенсивно используются относительно дефицитные факторы производства. Теорию эффекта масштаба разработали П. Кругман и К. Ланкастер, показав, что страны мирового сообщества с конкурентоспособной промышленностью и экономикой в целом обеспечены основными факторами производства в сходных пропорциях, и в этих условиях им выгодно специализироваться на тех отраслях, которые характеризуются наличием эффекта массового производства.

Далее автор, обобщая исследования, показывает, что существенный вклад в теорию экономического развития внес лауреат Нобелевской премии Р. Лукас, который основывал свой подход на том, что одним из факторов успешного развития производства является «человеческий капитал», т. е. навыки, умения, знания, профессиональные компетенции и согласованность действий.

Широко известная теория конкурентных преимуществ, сформулированная М. Портером, также основывается на том, что любая страна имеет определенный набор конкурентных преимуществ: более высокие уровни производительности труда, квалификации производственного, технического, коммерческого персонала тех или иных отраслей.

Автор разделяет точку зрения, согласно которой конкурентное преимущество на основе только одного или двух детерминантов возможно только в отраслях с зависимостью от природных ресурсов или редким использованием сложных технологий и навыков. Для получения и удержания конкурентного преимущества в наукоемких отраслях, составляющих основу любой развитой экономики, нужно иметь преимущество во всех составных частях национальной системы [6] .

При этом автор считает целесообразным обратить внимание на то, что в сложных отраслях, составляющих основу любой экономики с конкурентоспособной промышленностью, страна не наследует, а создает наиболее существенные факторы производства, такие как квалифицированная рабочая сила или научно-техническая база производства. По мнению М. Портера, именно на внутреннем рынке в условиях рыночного спроса получают апробацию новые изделия на основании инновационных технологий до выхода на мировой рынок.

Автор при этом рассматривает ракетно-космическую отрасль, родственные и поддерживающие отрасли как обеспечивающие экспортно-ориентированные отрасли необходимыми материалами, полуфабрикатами, комплектующими изделиями и другими материальными средствами и информацией, которые необходимы для создания и поддержания конкурентных преимуществ конкурентоспособных отраслей в РФ в сравнительной характеристике с экономикой стран мирового сообщества [7–9].

Как известно, индикаторы международной торговли технологиями характеризуют позиции России в глобализированном масштабе. По оценкам аналитиков объемы российского экспорта и импорта технологий выросли за анализируемый период в 8,9 раза, достигнув в 1,6 млрд долл. Выплаты по импорту технологий значительно превышали суммы поступлений от экспорта, образуя отрицательное сальдо, превысившее 1 млрд долл. [10–12].

Суммарный оборот экспорта и импорта технологий в России составил 2,2 млрд долл., увеличившись в 5,8 раз. Автор показывает, что по объему торговли технологиями Россия уступает большинству экономически развитых государств. Недостатком российской торговли технологиями выступает преобладание неохраноспособных видов интеллектуальной собственности. В экспорте технологиями доминируют инжиниринговые услуги – 66,5 %, в структуре импорта технологий аналогичная величина – 29 %, что свидетельствует о неэффективном характере торговли технологиями [13–15].

География российского технологического экспорта характеризуется его преимущественной ориентацией на рынки развивающихся стран, а доля государств ОЭСР в структуре экспорта технологий устойчиво

сохраняется на уровне, немногим выше 40 %. Удельный вес стран СНГ за последнее десятилетие вырос с 3,5 до 12,8 %, при этом государства ОЭСР остаются крупнейшими партнерами России по импорту технологий [16; 17].

Обобщая изложенное, автор показывает, что для обеспечения ожидаемых структурных сдвигов в современных наукоемких конкурентоспособных ракетно-космических технологических направлениях экономической системы России, для достижения высокого уровня конкурентоспособности ее промышленности назрела необходимость в разработке современного интегрированного управленческого подхода для решения поставленной фундаментальной экономической проблемы и соответствующего ему инновационного инструментария, что предлагаемые авторский научно-практический подход, методология и ориентированный на международный опыт инновационный инструментарий внесут определенный вклад в обеспечение востребованных современностью структурных сдвигов, формирование приоритетных направлений российской политики конкурентоспособности и ее приоритетной ракетно-космической отрасли [18].

Библиографические ссылки

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологии и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий РФ : Указ Президента РФ от 7.07.2011 г. № 899 [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru.

2. Ясин Е. М. Российская экономика: прогнозы и тенденции // Промышленность. 2013. № 12 . С. 1–24.

3. Попова Т. С. Фундаментальные проблемы формирования инновационного потенциала для достижения конкурентоспособности // Шестой кадровый форум Черноземья (второе междунар. заседание) : сб. ст. Воронеж, 2013. С. 80–85.

4. Об утверждении приоритетных направлений государственной поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности в Красноярском крае : Постановление Законодательного Собрания Красноярского края от 07.07.2009 г. № 8-3635 П. [Электронный ресурс]. URL: http://www.sobranie.info/lawsimfo.php?UID=6915.

5. Попова Т. С. Конкурентные преимущества и экономический потенциал регионов в национальном богатстве России // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 218–223.

6. Попова Т. С. Политика и стратегия обеспечения персоналом государственной службы // Кадровик. М. : Панорама, 2010. № 12. С. 16–24.

7. Об утверждении Стратегия инновационного развития Красноярского края на период до 2020 г. «Инновационный край–2020» : Указ Губернатора Красноярского края от 24.11.2011 г. № 218-уг [Электронный ресурс]. URL: www.http://consultant.ru.

8. Тихомирова Е. И. Экономический рост и конкурентоспособность российских регионов : стат.-эконом. исследование / Федер. агентство по образованию. Самара : Самар. гос. экон. ун-т, 2006. 418 с.

9. Данилов И. П. Конкурентоспособность регионов России: теоретические основы и методология. М. : Канон+, 2007. 368 с.

10. Кузнецова Е. И. Развитие конкурентных отношений и экономическая стратегия государства. М. : Закон и право, 2008. 383 с.

11. Конкурентоспособность России в глобальной экономике / науч. рук. А. А. Дынкин. М. : Междунар. отношения, 2003. 374 с.

12. Геоэкономика и конкурентоспособность России : науч.-концепт. основы геоэконом. политики России // науч.-аналит. докл. Обществ. акад. наук геоэкономики и глобалистики и др. / под науч. ред. Э. Г. Кочетова. М. : Кн. и бизнес, 2010. 387 с.

13. Совершенствование архитектуры внешнеэкономических связей и повышение международной конкурентоспособности России : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (22 апр. 2009 г.) / Моск. гос. ин-т междунар. отношений (ун-т) МИД России ; под ред. И. Н. Платоновой. М. : МГИМО-Университет, 2010. 297 с.

14. Производительный труд как важный потенциал национальной конкурентоспособности : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (16–17 февр. 2012 г.) / Воронеж. гос. ун-т ; под ред. И. Т. Корогодина, В. В. Гаврилова. Воронеж : Научная книга, 2012. 275 с.

15. Полынев А. О. Конкурентные возможности регионов : методология исследования и пути повышения / М-во экон. развития Рос. Федерации; Рос. акад. наук; Гос. науч.-исслед. учреждение «Совет по изучению производительных сил». М. : URSS : Красанд, 2010. 207 с.

16. Корогодин И. Т. Конкурентоспособная экономика как результат ее инновационного развития : вопросы теории и методологии. М. : РУДН, 2010. 200 с.

17. Кузнецова Е. И. Экономическая безопасность и конкурентоспособность: формирование экономической стратегии государства : монография. М. : Юнити-Дана, 2012. 238 с.

18. Попова Т. С. Управление персоналом в структурных преобразованиях российских инновационных компаний в конкурентоспособных наукоемких отраслях промышленности // Седьмой кадровый форум Черноземья (третье междунар. заседание) (31 мая 2014 г.) : сб. ст. Воронеж : ВГУ, 2014. С. 86–91.

References

1. *Ob utverzhdenii prioritetnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologiy RF: Ukaz Prezidenta RF ot 7.07.2011 № 899* [Approval of the priority directions of development of science, technology and engineering in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation. Presidential Decree from 7.07.2011 No. 899] (In Russ.) Available at: http://www.consultant.ru. (accessed 7.07.2011).

2. Yasin E. M. [Russian Economy: Trends and forecasts]. *Industry.* 2013, no. 12, p. 1–24. (In Russ.)

3. Popova T. S. *Fundamental'nyye problemy formirovaniya innovatsionnogo potentsiala dlya*

dostizheniya konkurentosposobnosti. Sbornik statey shestogo Kadrovogo Foruma Chernozem'ya (vtoroye mezhdunarodnoye zasedaniye). [Fundamental problems of innovative capacity for competitiveness. Collection of articles of the sixth HR Forum black earth region (second international meeting)]. St. Voronezh, 2013, p. 80–85.

4. *Ob utverzhdenii prioritetnykh napravleniy gosudarstvennoy podderzhki nauchnoy, nauchno-tekhnicheskoy i innovatsionnoy deyatel'nosti v Krasnoyarskom kraye: Postanovleniye zakonodatel'nogo sobraniya Krasnoyarskogo kraya ot 07.07.2009 № 8-3635 P* [On approval of the priorities of the state support of scientific, technological and innovation activities in the Krasnoyarsk Territory: Resolution of the Legislative Assembly of Krasnoyarsk Krai of 07.07.2009 № 8-3635 P] (In Russ.) Available at: http: // www.:sobranie.info/ lawsimfo.phpUID=6915.

5. Popova T. S. [Competitive advantages and economic potential of the regions in the national wealth of Russia]. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 4 (44), p. 218–223. (In Russ.)

6. Popova T. S. [Policy and strategy of security personnel of the state service]. *Kadrovik*. Moscow, Panorama Publ., 2010, no. 12, p. 16–24. (In Russ.)

7. *Ob utverzhdenii "Strategiya innovatsionnogo razvitiya Krasnoyarskogo kraya na period do 2020 g. "Innovatsionnyy kray–2020" : Ukaz Gubernatora Krasnoyarskogo kraya ot 24.11.2011. № 218-ug* [Decree of the Governor of the Krasnoyarsk Territory "On approval of the "Strategy of innovative development of the Krasnoyarsk Territory for the period up to 2020 "Innovative edge-2020" on November 24, 2011 No218-yr] (In Russ.) Available at: http: //consultant.ru. (accessed 04.04.2014).

8. Tikhomirova E. I. *Ekonomicheskiy rost i konkurentosposobnost' rossiyskikh regionov: statistiko-ekonomicheskoye issledovaniye. Feder. agentstvo po obrazovaniyu* [Economic growth and the competitiveness of Russian regions: statistical and economic. Study. Feder. education Agency] Samara, Samara. State Econ. University Publ., 2006, 418 p.

9. Danilov I. P. *Konkurentosposobnost' regionov Rossii: teoreticheskiye osnovy i metodologiya* [The competitiveness of regions: a theoretical framework and methodology]. Moscow, Kanon+ Publ., 2007, 368 p.

10. Kuznetsova E. I. *Razvitiye konkurentnykh otnosheniy i ekonomicheskaya strategiya gosudarstva.* [The development of competitive relations and economic strategy of the state]. Moscow, Zakon i pravo Publ., 2008, 383 p.

11. *Konkurentosposobnost' Rossii v global'noy ekonomike. Nauch. ruk. A. A. Dynkin.* [Russia's competitiveness in the global economy. Lea. hands. A. A. Dynkin]. Moscow, Mezhdunar. Otnosheniya Publ., 2003, 374 p.

12. *Geoekonomika i konkurentosposobnost' Rossii : nauch.-kontsept. osnovy geoekon. politiki Rossii : nauch.-analit. dokl. Obshchestv. akad. nauk geoekonomiki i globalistiki i dr.; pod nauch. red. E. G. Kochetova.* [Geo-Economics and competitiveness of Russia : nauch.-a concept. basics geoecon. policy of Russia. Nauch.-analyte. dokl. Societies. Acad. Sciences geo-Economics and global studies, and others; scientific. ed. E. G. Kochetov]. Moscow, Kn. i biznes Publ., 2010, 387 p.

13. *Sovershenstvovaniye arkhitektury vneshne-ekonomicheskikh svyazey i povysheniye mezhdunarodnoy konkurentosposobnosti Rossii : materialy mezhdunar. nauch.-prakt.konf., 22 apr. 2009 g. Mosk. gos. in-t mezhdunar. otnosheniy (un-t) MID Rossii, pod red. I. N. Platonovoy.* [Improving the architecture of foreign economic relations and increase the international competitiveness of Russia. Proceedings of the international. scientific-practical conference., April 22. 2009 Moscow State. Inst Internat. Relations (University) MFA Russia Univ. Intern. ehkon. relations and vneshneekon. relations; ed. I. N. Platonovoy]. Moscow, MGIMO-Universitet Publ., 2010, 297 p.

14. *Proizvoditel'nyy trud kak vazhnyy potentsial natsional'noy konkurentosposobnosti : materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 16–17 fevralya 2012. Voronezh, gos. un-t, ekon. fak., kaf. obshchey ekon. teorii; pod red.: I. T. Korogodina, V. V. Gavrilova.* [Productive labour as an important potential national competitiveness. Proceedings of the international scientific-practical conference on February 16–17, 2012. St. Voronezh, University, econ. factor., kaf. general ehkon. theory. Edited by J. T.: Korogodina, V. V. Gavrilov]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2012, 275 p.

15. Polynev A. O. *Konkurentnyye vozmozhnosti regionov : metodologiya issledovaniya i puti povysheniya. M-vo ekon. razvitiya Ros. Federatsii, Ros. akad. nauk, Gos. auch.-issled. uchrezhdeniye "Sovet po izucheniyu proizvoditel'nykh sil".* [Competitive regions: research methodology and ways to improve]. M-in econ. development in Russia. Federation, Rus. Acad. Sciences, State. ouch.-issled. the establishment of the "Council for the study of productive forces". Moscow, URSS, Krasang Publ., 2010, 207 p.

16. Korogodin I. T. *Konkurentosposobnaya ekonomika kak rezul'tat yeye innovatsionnogo razvitiya : voprosy teorii i metodologii.* [Competitive economy as a result of its innovative development : issues of theory and methodology]. Moscow, RUDN Publ., 2010, 200 p.

17. Kuznetsova E. I. *Ekonomicheskaya bezopasnost' i konkurentosposobnost' : formirovaniye ekonomicheskoy strategii gosudarstva : monografiya.* [Economic security and competitiveness : the formation of the economic strategy of the state. Monograph]. Moscow, Uniti-Dana Publ., 2012, 238 p.

18. Popova T. S. *Upravleniye personalom v strukturnykh preobrazovaniyakh rossiyskikh innovatsionnykh kompaniy v konkurentosposobnykh naukoyemkikh otraslyakh promyshlennosti / Sbornik statey sed'mogo Kadrovogo Foruma Chernozem'ya (tret'ye mezhdunarodnoye zasedaniye) 31 maya 2014* [Management personnel in the structural transformation of the Russian innovative companies in the competitive high-tech industries. Collection of articles of the seventh HR Forum black earth region (the third international meeting on may 31, 2014] Voronezh, Voronezh state University Publ., 2014, p. 86–91.

© Попова Т. С., 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акланов Федор Анатольевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Аплеснин Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: aplesnin@sibsau.ru.

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.

Бакин Андрей Михайлович – старший преподаватель кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Банникова Анастасия Владимировна – аспирант института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: bannikova.anast@gmail.ru.

Брестер Кристина Юрьевна – магистр техники и технологий, младший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: christina.bre@yandex.ru.

Бычков Сергей Сергеевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: bychkovss_va@mail.ru.

Вайнштейн Исаак Иосифович – кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail isvain@mail.ru.

Веселков Сергей Александрович – директор обсерватории, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pulsar1963@yandex.ru.

Вишневская Софья Романовна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vishni@ngs.ru.

Галяс Анатолий Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: kazimir@physics.by.

Голованова Василина Валерьевна – ведущий инженер отдела целевых программ, Конструкторское бюро «Арсенал» им. М. В. Фрунзе» (Санкт-Петербург); аспирантка, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. E-mail: vasilin-a@rambler.ru.

Демиденко Николай Данилович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН. E-mail: klvation@gmail.com.

Докшанин Сергей Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики, Сибирский федеральный университет. E-mail: Sergey_dokshanin@mail.ru.

Ереско Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры основ конструирования машин, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: okm@sibsau.ru.

Ереско Татьяна Трофимовна – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой основ конструирования машин, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: okm@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.

Захаров Владимир Владимирович – студент 3-го курса кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет. E-mail: vavuh13@gmail.com.

Зеленков Павел Викторович – проректор по информатизации и коммерциализации научных разработок – начальник научно-исследовательского управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Золотарев Вячеслав Владимирович – доцент кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zolotorev@sibsau.ru.

Иванов Александр Иванович – доктор технических наук, доцент, начальник лаборатории нейросетевых и биометрических технологий, ОАО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт». E-mail: ivan@pniei.penza.ru.

Исмаилов Борис Николаевич – аспирант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Карнаухов Михаил Андреевич – студент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет. E-mail: MKarnaukhov.KI11@gmail.com.

Карпенко Екатерина Валерьевна – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: cat.kras@gmail.com.

Качалин Сергей Викторович – аспирант, Пензенский государственный университет. E-mail: s.kachalin@gmail.com.

Киреев Виталий Александрович – аспирант, Институт математики и фундаментальной информатики, Сибирский федеральный университет. E-mail: kireevvit@gmail.com.

Климук Владимир Владимирович – аспирант кафедры экономики и финансов, Балтийский федеральный университет имени И. Канта. E-mail: klim-w11@rambler.ru.

Ковалев Дмитрий Игоревич – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Ковалев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Колбасина Наталья Анатольевна – кандидат технический наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет. E-mail: natalya-kolbasina@yandex.ru.

Колева Елена Георгиева – доктор, институт электроники болгарской академии наук, Технологический центр электронно-лучевых и плазменных технологий. E-mail: eligeorg@abv.bg.

Коплярова Надежда Владимировна – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: koplyarovanv@mail.ru.

Корнеева Анна Анатальевна – аспирант, институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru.

Корнет Мария Евгеньевна – соискатель, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: maria4business@mail.ru.

Коромыслова Александра Андреевна – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: akoromyslova@mail.ru.

Краснобаев Юрий Вадимович – доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: uvkras@mail.ru.

Кретинин Василий Владимирович – студент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kretin@mail.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кукушкин Сергей Геннадьевич – заместитель генерального директора по управлению персоналом, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kukushkin@iss-reshetnev.ru.

Кулагина Людмила Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: klvation@gmail.com.

Лапухин Евгений Геннадьевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: slovoktk@mail.ru.

Легалов Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, Сибирский федеральный университет. E-mail: legalov@mail.ru.

Макаренко Настасья Олеговна – старший преподаватель кафедры бухгалтерского учета, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: makarenko_nastja@mail.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru.

Миронов Валерий Леонидович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией радиофизики дистанционного зондирования, Институт физики СО РАН; заведующий кафедрой космических материалов и технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru.

Михайлов Михаил Иванович – инженер лаборатории радиофизики дистанционного зондирования, Институт физики СО РАН. E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru.

Михов Евгений Дмитриевич – инженер, Сибирский федеральный университет. E-mail: edmihov@mail.ru.

Младенов Георгий Михайлович – доктор физических наук, профессор, член-корреспондент Болгарской академии наук, Институт электроники Болгарской академии наук, Технологический центр электронно-лучевых и плазменных технологий. E-mail: mladenov@ie.bas.bg; gmmladenov@abv.bg.

Морозов Денис Иванович – старший преподаватель кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет. E-mail: danner2@mail.ru.

Музалевский Константин Викторович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории радиофизики дистанционного зондирования, Институт физики СО РАН; старший преподаватель кафедры космических материалов и технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail rsdkm@ksc.krasn.ru.

Носачевская Екатерина Александровна – кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры общественных наук, Московский государственный гуманитарный университет имени М. А. Шолохова. E-mail: 08082007@mail.ru.

Оборина Людмила Ивановна – аспирант кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Остапенко Алексей Александрович – студент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kuraxara1992@mail.ru.

Панасевич Алёна Михайловна – аспирант, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: alyona_panasevich@mail.ru.

Першакова Кристина Константиновна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kleniks@mail.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.

Пономарёв Сергей Иванович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Serg_ponom@mail.ru.

Попов Алексей Михайлович – доктор физико-математических наук, директор института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vm_popov@sibsau.ru.

Попова Татьяна Сергеевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления, организации производства и отраслевой экономики, Воронежский государственный университет инженерных технологий. E-mail: dysya704@mail.ru.

Проскурин Александр Викторович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Proskurin.AV.WOF@gmail.com.

Рогозина Марина Степановна – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: rogozina.marina@mail.ru.

Рыжиков Иван Сергеевич – инженер-исследователь научно-исследовательского управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru.

Сабиров Рашид Альтавович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики и кафедры летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rashidsab@mail.ru.

Самохвалова Светлана Михайловна – кандидат экономических наук, доцент кафедры международного кадрового и проектного управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: merlanabox@mail.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, старший преподаватель 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.

Серикова Наталья Игоревна – аспирант, Пензенский государственный университет. E-mail: n.i.serikova@yandex.ru.

Трифанов Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством и сертификации, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Трушников Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики, Пермский национальный исследовательский университет. E-mail: trdimitr@yandex.ru.

Туева Евгения Вячеславовна – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Тушко Тамара Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: TTushko@sfu-kras.ru.

Фарков Михаил Александрович – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: mihail.farkov@gmail.com.

Федотова Ирина Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: firim@mail.ru.

Чудновский Максим Михайлович – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: chudnovskymax@gmail.com.

Шендель Артем Сергеевич – студент 5 курса кафедры космических средств и технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: artem_shendel@mail.ru.

Яковлев Евгений Иосифович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yei@nm.ru.

Янушкевич Казимир Иосифович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: kazimir@physics.by.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhmedova Shakhnaz Agasuvar kyzy – Master's Degree student, junior research fellow, Siberian State Aerospace University. E-mail: shahnaz@inbox.ru.

Aklanov Fedor Anatol'yevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University, named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Aplesnin Sergey Stepanovich – Doctor of Phisical and Mathematical Sciences, professor, head of the Department of Physics, Siberian State Aerospace University named after academician M.F.Reshetnev. E-mail: aplesnin@sibsau.ru.

Bakin Andrej Mihajlovich – senior teacher of Quality management and Certification Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Bannikova Anastasiya Vladimirovna – postgraduate student of Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: bannikova.anast@gmail.ru.

Brester Christina Yuryevna – Master's Degree student, junior research fellow, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: christina.bre@yandex.ru.

Bychkov Sergey Sergeevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: bychkovss_va@mail.ru.

Chudnovskiy Maksim Mikhailovich – postgraduate, Siberian Federal University. E-mail: chudnovskymax@gmail.com.

Demidenko Nikolay Danilovich – PhD, full professor, Head scientist researcher, SDTB "Nauka" KSC SB RA. E-mail: klvation@gmail.com.

Dokshanin Sergey Georgievich – Candidate of Engineering Science, associate professor of Applied Mechanics Department, Siberian Federal University. E-mail: Sergey_dokshanin@mail.ru.

Eresko Sergei Pavlovich – Doctor of Engineering Science, Professor, Honored Inventor of RF, Professor of Fundamentals of machine design Department, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. E-mail: okm@sibsau.ru.

Eresko Tatiana Trofimovna – Doctor of Engineering Science, associate professor, Head of Fundamentals of machine design Department, Siberian State Aerospace University named after academician M.F Reshetnev. E-mail: okm @ sibsau.ru.

Erygina Lilia Viktorovna – Doctor of Economics, professor, dean of Engineering-economics department, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. E-mail: erigina@sibsau.ru.

Farkov Mikhail Aleksandrovich – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: mihail.farkov@gmail.com.

Fedotova Irina Michailovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of Applied Mathematics and Computer Security Department, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail firim@mail.ru.

Galyas Anatoliy Ivanovich – Candidate of Phisical and Mathematical Sciences, Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus. E-mail: kazimir@physics.by.

Golovanova Vasilina Valerjevna – postgraduate student, leading engineer of the Department of special-purpose programmes, FGUP "Development laboratory "Arsenal" named after M.V. Frunze", Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. E-mail: vasilin-a@rambler.ru

Ismailov Boris Nikolaevich – postgraduate student of Quality management and Certification Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Ivanov Alexander Ivanovich – Doctor of Engineering Sciences, associate professor, head of the laboratory of neural network and biometrics «Penza research Electrotechnical Institute». E-mail: ivan@pniei.penza.ru.

Kachalin Sergey Viktorovich – postgraduate student, Penza State University. E-mail: s.kachalin@gmail.com.

Karnaukhov Mikhail Andreevich – student of the Institute of space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: MKarnaukhov.KI11@gmail.com.

Karpenko Ekaterina Valer'evna – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: cat.kras@gmail.com.

Kireev Vitaliy Aleksandrovich – postgraduate student, Institute of Mathematics and fundamental informatics, Siberian Federal University. E-mail: kireevvit@gmail.com.

Klimuk Vladimir Vladimirovich – postgraduate student of the Department of Economics and Finance, Baltic Federal University named after I. Kant. E-mail: klim-w11@rambler.ru.

Kolbasina Natal'ya Anatol'evna – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Siberian Federal University. E-mail: natalya-kolbasina@yandex.ru.

Koleva Elena Georgieva – Doctor, Institute of Electronics of Bulgarian Academy of Sciences, Technology Center of Electron Beam and Plasma Technologies. E-mail: eligeorg@abv.bg.

Koplyarova Nadezhda Vladimirovna – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: koplyarovanv@mail.ru.

Korneeva Anna Anatal'yevna – postgraduate student of Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru.

Kornet Maria Yevgen'yevna– degree seeking applicant, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: maria4business@mail.ru.

Koromyslova Alexandra Andreevna – student, Siberian State Aerospace University. E-mail: akoromyslova@mail.ru.

Kovalev Dmitry Igorevich – student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Kovalev Igor Vladimirovich – Doctor of Engineering Science, Professor of System analysis Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Krasnobaev Yuri Vadimovich – Doctor of Engineering Science, professor of the Department of system for automatics, computer – aided control and design of the Institute of space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: uvkras@mail.ru.

Kretinin Vasiliy Vladimirovich – student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kretin@mail.ru.

Krushenko Genry Gavrilovich – Doctor of Engineering Sciences, professor of the Department of Aircraft engines, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, chief researcher of the Institute of Computational Modeling of Siberian branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kukushkin Sergey Gennadyevich – Deputy CEO for personnel management of JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kukushkin@iss-reshetnev.ru.

Kulagina Liudmila Vladimirovna – PhD, associated professor, Siberian Federal University. E-mail: klvation@gmail.com.

Lapukhin Yevgeniy Gennad'yevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: slovoktk@mail.ru.

Legalov Alexander Ivanovich – Doctor of Engineering Science, Professor. E-mail: legalov@mail.ru.

Makarenko Nastasya Olegovna – senior teacher of Accounting Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: makarenko_nastja@mail.ru.

Medvedev Alexander Vasil'yevich – Doctor of Engineering Science, Professor of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru.

Mihov Eugene Dmitriyevich – engineer, Siberian Federal University. E-mail: edmihov@mail.ru.

Mikhailov Mikhail Ivanovich – engineer of the Laboratory of Radiophysics of the Earth Remote Sensing of the Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru.

Mironov Valeriy Leonidovich – Doctor of Phisical and Mathematical Sciences, professor, corresponding member of the RAS, head of the Laboratory of Radiophysics of the Earth Remote Sensing of the Kirensky Institute of Physics SB RAS, head of the Department of the KMT IKIVT, Siberian State Aerospace University named after academician M.F.Reshetnev. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru.

Mladenov Georgy Mihaylov – Doctor of Phisical Science, Professor, Corr.Mem. of Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Electronics of Bulgarian Academy of Sciences, Technology Center of Electron Beam and Plasma Technologies. E-mail: mladenov@ie.bas.bg; gmmladenov@abv.bg.

Morozov Denis Ivanovich – senior teacher, Siberian Federal University. E-mail: danner2@mail.ru.

Muzalevskiy Konstantin Viktorovich – Candidate of Phisical and Mathematical Sciences, research fellow of the Laboratory of Radiophysics of the Earth Remote Sensing of the Kirensky Institute of Physics SB RAS, senior teacher of the KMT IKIVT, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru.

Nosachevskaya Ekaterina Alexandrovna – Candidate of Economic Sciences, senior lecturer of the Department of Social Sciences, Moscow State Humanitarian University named after M. A. Sholokhov. E-mail: 08082007@mail.ru.

Oborina Ljudmila Ivanovna – postgraduate student of Quality management and Certification Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Ostapenko Aleksey Aleksandrovich – student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F.Reshetnev. E-mail: kuraxara1992@mail.ru.

Panasevich Aliona Mikhaylovna – postgraduate student, Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus. E-mail: alyona_panasevich@mail.ru.

Pershakova Christina Konstantinovna – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kleniks@mail.ru.

Podverbnykh Ulyana Sergeevna – postgraduate student of the Department of international personnel and project management, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: verba07.90@mail.ru.

Ponomarev Sergei Ivanovich – senior teacher of Mechanical Engineering Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Serg_ponom@mail.ru.

Popov Aleksey Mikhaylovich – Doctor of physical and mathematical sciences, director of Institute of Informatics and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: vm_popov@sibsau.ru.

Proskurin Alexander Victorovich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Proskurin.AV.WOF@gmail.com.

Rogozina Marina Stepanovna – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: rogozina.marina@mail.ru.

Ryzhikov Ivam Sergeevich – research engineer of Research and Development Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru.

Sabirov Rasheed Altavovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of the department of Technical Mechanics, Siberian State Aerospace University. E-mail: rashidsab@mail.ru.

Samohvalova Svetlana Mihailovna – Candidate of Economic Sciences, associate professor the Department of International personnel and project management, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: merlanabox@mail.ru.

Semenkin Evgeny Stanislavovich – Doctor of Engineering Science, professor, professor of the Department of System analysis and research of operations, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru.

Semenkina Maria Evgenyevna – Candidate of Engineering Science, senior teacher of Higher Mathematics Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: semenkina88@mail.ru.

Semenkina Olga Ernestovna – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Higher Mathematics Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: semenkina.olga@mail.ru.

Sergeeva Natalia Alexandrovna – Candidate of Engineering sciences, associate professor of the Department of Informatics, Institution of Space and Information technologies, Siberian Federal University. E-mail: sergena@list.ru.

Serikova Natalia Igorevna – postgraduate student, Penza State University. E-mail: n.i.serikova@yandex.ru.

Shendel Artem Sergeyevich – student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: artem_shendel@mail.ru.

Trifanov Ivan Vasil'evich – Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Quality management and Certification Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Trushnikov Dmitriy Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor of Applied Physics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: trdimitr@yandex.ru.

Tueva Eugene Vecheslavovna – student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Tushko Tamara Alekseyevna – Candidate of Phisical and Mathematical Sciences, associate professor, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: TTushko@sfu-kras.ru.

Vainshtein Isaak Iosifovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, Professor of Applied Mathematics and Computer Security Department, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail isvain@mail.ru.

Veselkov Sergey Aleksandrovich – director of observatory of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: pulsar1963@yandex.ru.

Vishnevskaya Sofya Romanovna – Candidate of Engineering Science, associate professor, Head of Higher Mathematics Department, Siberian State Aerospace University. E-mail: vishni@ngs.ru.

Yakovlev Eugeny Iosiphovich – Candidate of Phisical and Mathematical Sciences, associate professor, associate professor of Higher Mathematics Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail:yei@nm.ru.

Yanushkevich Kazimir Iosifovich – Doctor of Phisical and Mathematical Sciences, head of the Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus. E-mail: kazimir@physics.by.

Zakharov Vladimir Vladimirovich – student of the Institute of space and information technologies, Siberian Federal University. E-mail: vavuh13@gmail.com.

Zelenkov Pavel Viktorovich – head of Research and Development Department, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Zolotarev Vyacheslav Vladimirovich – associate professor of Information Technology Security department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: zolotorev@sibsau.ru.