

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

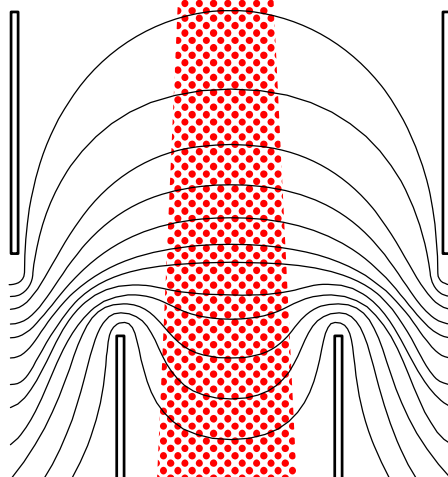
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **2**

Т. 66
2023

Journal of **I**nstrument **E**ngineering



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

проф. А. А. БОБЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. КЛИМЧИК, PhD, доцент, Университет Иннополис, Иннополис, Россия
С. А. КОЛЮБИН, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. КОНЯХИН, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. КРИШТОП, д-р физ.-мат. наук, проф., ПНИПУ, Пермь, Россия
Л. С. ЛИСИЦЫНА, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЪЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО „Феррум“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ „Авангард“», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн. наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *Л. Г. Позднякова*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО

Телефон: (812) 480-02-73, E-mail: pribor@itmo.ru
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)

Подписано в печать 27.02.2023 г.

Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А

Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru

Редколлегия просит авторов и рецензентов отнестись с пониманием к ужесточению требований к рукописям и изменению формы подачи материала в журнале.

Аннотация объемом 150—250 слов должна отражать содержание статьи: предмет исследования, цель работы, метод проведения работы, краткое описание экспериментальных или теоретических исследований, полученные результаты и рекомендации по их применению.

Ключевые слова, служащие идентификаторами при предметном поиске, должны однозначно отражать содержание статьи. Основное ключевое слово/словосочетание указывается первым, общее количество ключевых слов — не менее 5.

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 (при составлении списка преимущество следует отдавать изданиям, включенным в международные базы цитирования Scopus и Web of Science).

Новые требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала <http://pribor.itmo.ru/>



Адрес: 197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)
E-mail: pribor@itmo.ru

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения, отражающие результаты практических и теоретических исследований в области приборостроения.

Журнал содержит следующие разделы: информационные технологии и системы, приборы и системы автоматического управления, вычислительная техника, приборы навигации, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, оптические и оптико-электронные приборы и системы, акустические приборы и системы, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, приборы, системы и изделия медицинского назначения, технология приборостроения, научные и практические разработки. По договоренности с Редакцией может быть опубликован специальный тематический выпуск, посвященный достаточно узкой проблеме приборостроения.

Рукопись подается по электронной почте: pribor@itmo.ru. Редакция принимает рукопись к рецензированию при условии получения полного комплекта документов, включающего:

- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (формат PDF);
- файлы рукописи статьи, оформленные в соответствии с требованиями журнала;
- сведения об авторах, заполненные по шаблону (на русском и английском языке);
- договор о передаче авторских прав.

Рукопись должна содержать:

- название статьи (на русском и английском языке), индекс УДК;
- аннотацию (150—250 слов, на русском и английском языке), ключевые слова (не менее 5 и не более 25, на русском и английском языке), основной текст, список литературы;
- рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

Объем текста (оформленного в соответствии с требованиями журнала — шрифт Times New Roman, размер — 14 пт, межстрочный интервал 1,5, поля — сверху и слева 25 мм, снизу 20 мм, справа 10 мм) должен составлять 10—20 страниц, краткого сообщения — 3—5. Объем обзора предварительно согласовывается с Редакцией.

Список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников (не менее половины из них должны представлять собой ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science). Список литературы должен формироваться в порядке появления ссылок в тексте.

Не допускается выравнивание с помощью пробелов, табуляций и символов конца абзаца. Эти символы при необходимости могут вставляться не более одного раза подряд (**не переносить с помощью дефисов**).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation). **Не вставлять** формулы из пакетов MathCad и MatLab. Размер шрифта в формулах — по умолчанию. Все переменные набираются курсивом, греческие буквы — прямым шрифтом, полужирные символы в формуле — стилем „матрица вектор“, русские символы — стилем „текст“, векторы следует набирать полужирным шрифтом без стрелок.

Рисунки выполняются в градациях серого в одном из форматов приложений Microsoft (Word, Excel, PowerPoint), предпочтителен векторный формат. Кривые на графиках следует помечать цифрами (1, 2, 3 и т.д.) или/и задавать линиями разного стиля (пунктир, штрихпунктир, жирная); толщина осей должна быть не менее 0,5 пт, иначе качество печати не гарантируется.

Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Ефанов Д. В. Особые свойства кодов Хэмминга, проявляющиеся при синтезе само-
проверяемых цифровых устройств 85
- Кулаков А. Ю. Выбор оптимальной конфигурации бортового комплекса космиче-
ского аппарата для восстановления его работоспособности 100
- Кулешов С. В., Шальнев И. О. Особенности реализации распределенной виртуаль-
ной машины при построении коммуникационной инфраструктуры общего на-
значения 112
- Захаров В. В., Баранов А. Ю., Соколов Б. В. Разработка и внедрение элементов
информационно-аналитической платформы для решения транспортно-логис-
тических задач 118

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Ким С. А., Маргун А. А., Пыркин А. А. Применение методов машинного обучения
для локализации отказов датчиков квадрокоптера 125

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ, ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

- Горбунов А. С., Елфимова М. В., Безбородов Ю. Н. Контроль степени термиче-
ских повреждений древесины путем измерения цветовых характеристик 131
- Ковалевич А. С., Кинжагулов И. Ю., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Экспери-
ментальное исследование параметров акустической эмиссии при циклических
испытаниях металлических изделий аддитивного производства 139

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Бойченко Е. С., Панченко А. В., Суркова А. А., Кирсанов Д. О. Применение
спектрометра с оптоволоконным зондом для оценки минимального числа злока-
чественных клеток по спектрам диффузного отражения в ближней инфракрас-
ной области 148

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Куликов Д. Д., Яблочников Е. И., Чукичев А. В., Абышев О. А. Методика фор-
мирования параметрических моделей деталей для автоматизированного проек-
тирования технологических процессов 155
- Ходунков В. П. Аномальное сжатие спектра как средство получения сверхпланковской
интенсивности 162

EDITOR-IN-CHIEF

*Dr. Sci., Prof. ALEXEY BOBTSOV,
ITMO University, St. Petersburg, Russia*

EDITORIAL BOARD

*ALESHKIN ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
BELIKOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BESSMERTNY IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BOGATYREV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
EFANOV DMITRY, Dr. Sci., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
KLIMCHIK ALEXANDER, PhD, Ass. Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
KOLYUBIN SERGEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KONYAKHIN IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KRISHTOP VIKTOR, Dr. Sci., Prof., PNRPU, Perm, Russia
LISITSYNA LYUBOV, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
LUKYANOV VALERY, Dr. Sci., Prof., Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
LYAMIN ANDREY, Dr. Sci., Ass. Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
MALOLETOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
MATVEEV YURIY, Dr. Sci., Speech Technology Center, St. Petersburg, Russia
MEDUNETSKY VIKTOR., Dr. Sci., Prof., Ferrum LLC, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
OZHIGANOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
PYRKIN ANTON, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., Research Institute of Optoelectronic Instrumentation, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TITOV DMITRY, Dr. Sci., Ass. Prof., SWSU, Kursk, Russia
FEDOROV ALEXEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
FILIMONOV NIKOLAY, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia
FURTAT IGOR, Dr. Sci., Ass. Prof., Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia*

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor Lidia G. Pozdniakova

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

Address: ITMO University, Kronverksky pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@itmo.ru

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 66

FEBRUARY 2023

№ 2

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Efanov D. V.** Special Properties of Hamming Codes that Appear when Synthesizing Self-checking Digital Devices..... 85
- Kulakov A. Yu.** Choosing the optimal configuration of the onboard complex of the spacecraft to restore its operability..... 100
- Kuleshov S. V., Shalnev I. O.** Features of the Implementation of a Distributed Virtual Machine When Building a General-purpose Communication Infrastructure..... 112
- Zakharov V. V., Baranov A. Yu., Sokolov B. V.** Development and Implementation of Elements of an Information and Analytical Platform for Solving Transport and Logistics Problems 118

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Kim S. A., Margyn A. A., Pyrkin A. A.** Application of Machine Learning Methods to Localize Quadcopter Sensor Failures 125

INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING

THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

- Gorbunov A. S., Elfimova M. V., Bezrodov Yu. N.** Monitoring the Degree of Wood Thermal Damage by Measuring Its Color Characteristics..... 131
- Kovalevich A. S., Kinzhagulov I. Yu., Stepanova K. A., Kuzivanov D. O.** Experimental Study of Acoustic Emission Parameters during Cyclic Testing of Metal Products of Additive Manufacturing 139

DEVICES, SYSTEMS, AND PRODUCTS FOR MEDICAL PURPOSE

- Boichenko E. S., Panchenko A. V., Surkova A. A., Kirsanov D. O.** Use of a Fiber Optic Spectrometer to Assess the Minimum Number of Malignant Cells by Diffuse Reflectance Spectra in the Near Infrared Region..... 148

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Kulikov D. D., Yablochnikov E. I., Chukichev A. V., Abyshev O. A.** Methodology for Creating Parametric Models of Parts for Automated Design of Technological Processes..... 155
- Khodunkov V. P.** Anomalous Spectrum Compression as a Means of Obtaining Radiation of Super-Planck Intensity 162

To the Authors!

The Journal of Instrument Engineering publishes scientific reviews, full-text articles and short messages, reflecting the unpublished results of theoretical and practical research in the field of fundamental instrument making.

The Journal publishes articles on the following themes: information technologies and systems, devices and automatic control systems, computer engineering, gyroscopic and navigation systems, instruments of precision mechanics, electronic and electromagnetic devices, optical and optoelectronic devices and systems, thermal regimes and reliability of devices and systems, technology and instrumentation, scientific and practical development. In agreement with the Editorial Board can be published a special themed issue devoted to a fairly narrow issue of instrumentation.

The material of the article accepted in electronic form and on any media, executed in a text editor Word without formatting along with a hard copy on A4. Electronic version of the paper may be sent by E-mail: **pribor@mail.ifmo.ru**

The size of the article (in printed form) must not exceed eight pages, a short presentation of two. Size scientific review previously agreed with the Editorial Board.

Submission includes two copies of:

— the manuscript text; list of references (recommended): review article — not less than 50, for the full text of the article — no less than 15, for short messages — at least 8 of the literary source (at least half of them should be links to the editions listed in international database of citation Scopus and Web of Science); number citations consecutively as they appear in the text;

— extended abstract (150—250 words);

— keywords (not less than 5 and not more than 25);

— illustrations: each on a separate sheet of A4 (not overestimate in the text) — big, with a maximum fill;

— the recommendation of the Department (laboratory);

— information about the authors on a template (surname, name, patronymic, name of the organization in accordance with the latest edition of the Charter, the address of the organization, academic degree and title, position, e-mail address).

The article must also enclose agreement on the transfer of copyright.

The main text. The following requirements are common to good practice in the design documents.

Font — Times New Roman, size 14, line spacing 1.5, margins — top and left — 25 mm, bottom — 20 mm, right — 10 mm.

Not allowed alignment with spaces, tabs and end of a paragraph (in the layout will need to be cleared). These symbols must be inserted only when necessary, and not more than once in a row (not to carry with dashes).

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

Figures and tables are to be inserted after the list of references. Graphics are accepted in one of Microsoft formats (Word, Excel, and PowerPoint); vector format is preferable. Don't use color graphics; it is better to apply dotted, dash-and dot lines, etc., or mark lines with numerical symbols.

Editorial Staff

ОСОБЫЕ СВОЙСТВА КОДОВ ХЭММИНГА,
ПРОЯВЛЯЮЩИЕСЯ ПРИ СИНТЕЗЕ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Д. В. ЕФАНОВ

*Российский университет транспорта, Москва, Россия,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
TrES-4b@yandex.ru*

Аннотация. Выявлены свойства классических кодов Хэмминга, связанные с особенностями обнаружения ошибок, возникающих одновременно как в информационных, так и контрольных разрядах кодовых слов, что актуально во многих приложениях, например, при синтезе самопроверяемых и отказоустойчивых цифровых вычислительных устройств и систем. Доказано, что при устремлении числа информационных разрядов m к бесконечности число необнаруживаемых ошибок, возникающих в информационных и контрольных разрядах кодов Хэмминга одновременно, возрастает в $2^k - 1$ раз (k — число контрольных разрядов), по сравнению с числом необнаруживаемых ошибок, возникающих только в информационных разрядах их кодовых слов. Также доказано, что при $m \rightarrow \infty$ показатель отношения числа необнаруживаемых ошибок, возникающих одновременно в информационных и контрольных разрядах, к числу необнаруживаемых ошибок, возникающих только в информационных разрядах, для кода Хэмминга с $k+q$ контрольными разрядами увеличивается в 2^q раз, по сравнению со значением для кода Хэмминга с k контрольными разрядами (здесь q — произвольное натуральное число). Установленные характеристики кодов Хэмминга целесообразно учитывать при синтезе самопроверяемых цифровых устройств. Приведены примеры учета установленных свойств кодов Хэмминга для синтеза схем встроенного контроля по методу логического дополнения.

Ключевые слова: код Хэмминга, контролепригодное цифровое устройство, самопроверяемое цифровое устройство, схема встроенного контроля, метод логического дополнения, необнаруживаемая ошибка

Ссылка для цитирования: Ефанов Д. В. Особые свойства кодов Хэмминга, проявляющиеся при синтезе самопроверяемых цифровых устройств // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 85—99. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-85-99.

SPECIAL PROPERTIES OF HAMMING CODES THAT APPEAR WHEN SYNTHESIZING SELF-CHECKING
DIGITAL DEVICES

D. V. Efanov

*Russian University of Transport, Moscow, Russia
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
TrES-4b@yandex.ru*

Abstract. Several properties of classical Hamming codes associated with the features of detecting errors that occur simultaneously in both information and control bits of code words are revealed, which is relevant in many applications, for example, in the synthesis of self-checking and fault-tolerant digital computing devices and systems. It is shown that when the number of cases of information bits m tends to infinity, the number of undetectable errors that arose simultaneously in the information and control bits of Hamming codes increases by $2^k - 1$ times with k being the number of control bits, as compared to the number of undetectable errors that occur only in the information bits of their code words. It is also proved that for $m \rightarrow \infty$, the ratio of the number of undetectable errors that occur simultaneously in information and control bits to the number of undetectable errors appearing only in information bits for a Hamming code with $k + q$ control bits increases by 2^q times with respect to the ratio for the Hamming code with k control bits (here q is an arbitrary natural number). The established characteristics of Hamming codes should be taken into account when synthesizing self-checking digital devices. Examples are given of the synthesis of built-in control circuits using the Boolean complement method with consideration of the revealed

properties of Hamming codes.

Keywords: Hamming code, controllable digital device, self-checking digital device, concurrent error-detection circuit, Boolean complement, undetectable error

For citation: Efanov D. V. Special properties of Hamming codes that appear when synthesizing self-checking digital devices. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 85—99 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-85-99.

Введение. Известные с середины прошлого столетия [1] коды Хэмминга широко применяются для защиты информации при ее хранении и передаче, а также при построении надежных цифровых устройств и вычислительных систем [2—5]. Следует отметить, что изучались и модифицировались они как самим Р. У. Хэммингом, так и многими другими инженерами и исследователями. Коды Хэмминга обладают большим количеством свойств, что и определило их широкую применимость. Наиболее часто упоминаются: возможность обнаружения любых одно- и двукратных ошибок, возможность коррекции любых однократных ошибок, простые схемы кодирования и декодирования. Эти свойства кодов Хэмминга позволяют применять их в различных приложениях. Например, при передаче данных в системах управления [6, 7], для защиты данных при хранении (в RAID 2, в ECC-памяти [8]), в конвертерах сигналов [9], при синтезе самокорректирующихся и отказоустойчивых структур логических устройств [10—13], при построении полностью самопроверяемых схем [5, 14].

В ряде публикаций [15—17], а также в монографии [5], освещены результаты исследований характеристик обнаружения ошибок кодами Хэмминга в схемах встроенного контроля (СВК) на случай разделения информационных и контрольных разрядов и формирования их независимыми блоками. Анализ показал, что вопросы обнаружения ошибок кодами Хэмминга в СВК при условии зависимости блоков, вычисляющих информационные и контрольные разряды, изучены не до конца.

В настоящей работе обратим внимание на установленные в ходе исследования свойства кодов Хэмминга, которые целесообразно учитывать при организации СВК, если фактически возможно одновременное искажение как информационных, так и контрольных разрядов. Таких возможностей применения кодов Хэмминга достаточно много, к ним можно отнести синтез СВК по методу логического дополнения [18, 19].

Особенности обнаружения ошибок кодами Хэмминга. В синтезируемых по методу логического дополнения устройствах ошибки на выходах, вызванные внутренними неисправностями объекта диагностирования, могут транслироваться в самой СВК на различные входы тестера, в том числе соответствующие информационным и контрольным векторам. Поэтому возникает задача исследования особенностей возникновения ошибок, как только в информационных разрядах, так и одновременно в информационных и в контрольных разрядах. Сфокусируем внимание именно на кодах Хэмминга. Введем для них следующее обозначение: H_m -коды (m — число информационных разрядов).

Прежде всего, отметим важную особенность применения разделимых кодов при организации СВК [20, 21]. Каждый код обладает своими особенностями обнаружения ошибок как в информационных разрядах, так и во всех разрядах кодовых слов (включая контрольные). Особенности определяются избыточностью кода, а также правилами вычисления контрольных разрядов. Все ошибки обнаруживаются, только когда используются коды с повторением. В таких кодах для каждого информационного разряда имеется отдельный контрольный разряд. Если код имеет меньше контрольных разрядов, чем информационных, то некоторая доля ошибок может быть не обнаружена.

Утверждение 1. Необнаруживаемые ошибки в кодовых словах разделимых кодов могут возникать при:

- а) искажении только части информационных разрядов кодовых слов;

б) одновременном искажении части информационных и контрольных разрядов кодовых слов.

Ошибки, возникающие только в контрольных разрядах, обнаруживаются всегда, так как нарушается соответствие между значениями информационных и контрольных разрядов.

Рассмотрим пример. Мощность множества кодовых слов H_4 -кода равна 16. При этом данный код имеет $k = 3$ контрольных разряда. Соответственно общее число искажений равно

$$\sum_{d=1}^{m+k} C_{m+k}^d = 2^{m+k} (2^{m+k} - 1) = 2^7 \cdot (2^7 - 1) = 65280.$$

Количество необнаруживаемых ошибок равно числу всевозможных переходов кодовых слов H_4 -кода в кодовые слова, также принадлежащие данному коду (всего $16 \times 15 = 240$). Например, если информационным векторам $\langle 0111 \rangle$ и $\langle 1001 \rangle$ сопоставлен один и тот же контрольный вектор $\langle 001 \rangle$ [5], ошибка, связанная с искажениями трех старших разрядов в информационных векторах, обнаружена H_4 -кодом не будет. Рассмотрим переход кодового слова с информационным вектором $\langle 0111 \rangle$ и контрольным вектором $\langle 001 \rangle$ в кодовое слово с информационным вектором $\langle 1110 \rangle$ и контрольным вектором $\langle 000 \rangle$. Он происходит при искажении старшего и младшего разрядов информационного вектора и младшего разряда контрольного вектора. Такая ошибка тоже не обнаружится H_4 -кодом.

Для задач технической диагностики, синтеза контролепригодных и самопроверяемых цифровых устройств и вычислительных систем важен учет характеристик обнаружения ошибок разделимыми кодами [5, 22, 23].

Общее число необнаруживаемых ошибок в кодовых словах при m информационных разрядах определяется величиной [21]:

$$N_m = 2^m (2^m - 1). \quad (1)$$

Общее число необнаруживаемых ошибок, возникающих в m информационных разрядах H_m -кодов при k контрольных разрядах, определяется по формуле [15]:

$$N_m^D = 2^m (2^{m-k} - 1). \quad (2)$$

Эта же формула применима при расчете общего числа необнаруживаемых ошибок известной модификации кода Хэмминга — SW_m -кода (число контрольных разрядов для конкретных значений m данного кода отличается от числа контрольных разрядов у H_m -кода) [24]. Кроме того, формула (2) справедлива и при рассмотрении любых иных разделимых кодов, обладающих свойством равномерности распределения всех информационных векторов между всеми контрольными векторами (так называемых оптимальных по критерию минимума общего количества необнаруживаемых ошибок при заданных m и k кодов [22, 23]).

В результате вычитания (2) из (1) получаем формулу подсчета общего числа необнаруживаемых ошибок, возникающих как в информационных, так и контрольных разрядах H_m -кодов:

$$\begin{aligned} N_{m+k}^{DC} &= N_m - N_m^D = 2^m (2^m - 1) - 2^m (2^{m-k} - 1) = \\ &= 2^m (2^m - 2^{m-k}) = 2^{2m} (1 - 2^{-k}). \end{aligned} \quad (3)$$

Введем коэффициент, показывающий, во сколько раз число необнаруживаемых ошибок, возникающих как в информационных, так и контрольных разрядах H_m -кодов, превышает число необнаруживаемых ошибок, возникающих только в их информационных разрядах:

$$\vartheta_m = \frac{N_{m+k}^{DC}}{N_m^D} = \frac{2^{2m} (1 - 2^{-k})}{2^m (2^{m-k} - 1)} = \frac{2^m - 2^{m-k}}{2^{m-k} - 1} = \frac{1 - 2^{-k}}{2^{-k} - 2^{-m}}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по формулам (1)—(4) численные характеристики H_m -кодов с различными значениями m . В 6-м и 7-м столбцах приведены значения α_m и β_m , вычисляемые по формулам:

$$\alpha_m = \frac{N_m^D}{N_m}, \quad (5)$$

$$\beta_m = \frac{N_{m+k}^{DC}}{N_m}. \quad (6)$$

Таблица 1

Характеристика не обнаруживаемых H_m -кодами ошибок

m	k	N_m	N_m^D	N_{m+k}^{DC}	α_m	β_m	ϑ_m
1	2	3	4	5	6	7	8
3	3	56	0	56	0	1	—
4	3	240	16	224	0,06667	0,93333	14
5	4	992	32	960	0,03226	0,96774	30
6	4	4032	192	3840	0,04762	0,95238	20
7	4	16256	896	15360	0,05512	0,94488	17,14286
8	4	65280	3840	61440	0,05882	0,94118	16
9	4	261632	15872	245760	0,06067	0,93933	15,48387
10	4	1047552	64512	983040	0,06158	0,93842	15,2381
11	4	4192256	260096	3932160	0,06204	0,93796	15,11811
12	5	16773120	520192	16252928	0,03101	0,96899	31,24409
13	5	67100672	2088960	65011712	0,03113	0,96887	31,12157
14	5	268419072	8372224	260046848	0,03119	0,96881	31,06067
15	5	1073709056	33521664	1040187392	0,03122	0,96878	31,0303
16	5	4294901760	134152192	4160749568	0,03124	0,96876	31,01514
17	5	17179738112	536739840	16642998272	0,03124	0,96876	31,00757
18	5	68719214592	2147221504	66571993088	0,03125	0,96875	31,00378
19	5	$2,74877 \cdot 10^{11}$	8589410304	$2,66288 \cdot 10^{11}$	0,03125	0,96875	31,00189
20	5	$1,09951 \cdot 10^{12}$	34358689792	$1,06515 \cdot 10^{12}$	0,03125	0,96875	31,00095
30	6	$1,15292 \cdot 10^{18}$	$1,80144 \cdot 10^{16}$	$1,13491 \cdot 10^{18}$	0,01562	0,98438	63
40	6	$1,20893 \cdot 10^{24}$	$1,88895 \cdot 10^{22}$	$1,19004 \cdot 10^{24}$	0,01562	0,98438	63
50	6	$1,26765 \cdot 10^{30}$	$1,9807 \cdot 10^{28}$	$1,24784 \cdot 10^{30}$	0,01562	0,98438	63
60	7	$1,32923 \cdot 10^{36}$	$1,03846 \cdot 10^{34}$	$1,31884 \cdot 10^{36}$	0,00781	0,99219	127
70	7	$1,3938 \cdot 10^{42}$	$1,0889 \cdot 10^{40}$	$1,38291 \cdot 10^{42}$	0,00781	0,99219	127
80	7	$1,4615 \cdot 10^{48}$	$1,1418 \cdot 10^{46}$	$1,45008 \cdot 10^{48}$	0,00781	0,99219	127
90	7	$1,5325 \cdot 10^{54}$	$1,19726 \cdot 10^{52}$	$1,52052 \cdot 10^{54}$	0,00781	0,99219	127
100	7	$1,60694 \cdot 10^{60}$	$1,25542 \cdot 10^{58}$	$1,59438 \cdot 10^{60}$	0,00781	0,99219	127

По столбцам для α_m и β_m видно, что доля не обнаруживаемых H_m -кодами ошибок только в информационных разрядах мала по сравнению с долей не обнаруживаемых H_m -кодами ошибок, возникающих и в информационных, и в контрольных разрядах одновременно. В 8-м столбце приведены рассчитанные данные для показателя ϑ_m . Анализ этого показателя при увеличении m позволяет установить следующее свойство, присущее H_m -кодам.

Утверждение 2. В пределе при $m \rightarrow \infty$ число необнаруживаемых ошибок, возникающих в информационных и контрольных разрядах H_m -кодов одновременно, увеличивается в $2^k - 1$ раз по сравнению с числом необнаруживаемых ошибок, возникающих только в информационных разрядах их кодовых слов.

Для доказательства формулировки утверждения 2 устремим значение m к бесконечности и найдем предел величины ϑ_m :

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \vartheta_m = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1 - 2^{-k}}{2^{-k} - 2^{-m}} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{2^k - 1}{1 - 2^{k-m}} = 2^k - 1. \quad (7)$$

На рис. 1, а приводится зависимость показателя ϑ_m от числа m : видно, что какой-либо стабильности в показателе ϑ_m не наблюдается при малых значениях m (менее 12). На рис. 1, б отдельно представлен график изменения рассматриваемого показателя при росте числа информационных разрядов до 20. При $m = 4$ значение ϑ_m минимально. При $m = 5$ достигается локальный максимум $\vartheta_m = 30$. Это обусловлено увеличением числа контрольных разрядов в H_m -коде. Для кодов с $m = 5$ —11 число контрольных разрядов $k = 4$. Значение показателя ϑ_m при росте m в рассматриваемом диапазоне постепенно уменьшается, достигая минимума при $m = 11$. При $m = 12$ в H_m -коде появляется новый контрольный разряд, что обуславливает скачок величины ϑ_m до отметки 31,24409. С дальнейшим ростом значения m в диапазоне 12—26 происходит постепенное уменьшение величины ϑ_m до 31,00001. Падение значения ϑ_m от $m = 12$ к 26 незначительно — порядка 0,25. Затем, при $m=27$, число контрольных разрядов вновь увеличивается, и происходит резкий скачок значения ϑ_m . С дальнейшим ростом m происходит вновь незначительное изменение показателя ϑ_m . Здесь уже уменьшаются десятитысячные доли, и значение ϑ_m неотличимо от $2^6 - 1 = 63$. Далее характер изменений повторяется.

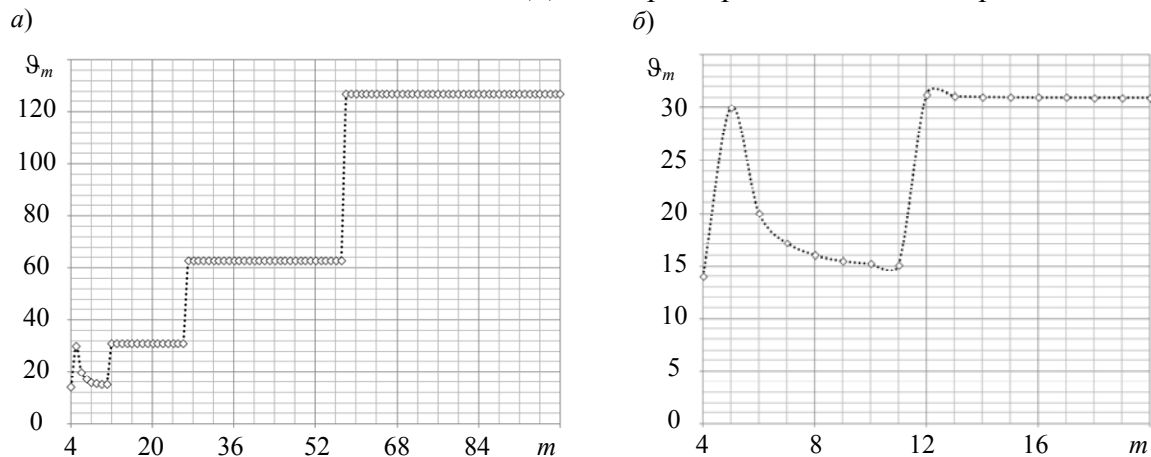


Рис. 1

Стоит отметить, что представленные на рис. 1 зависимости практически обратны зависимостям доли необнаруживаемых ошибок, возникающих только в информационных разрядах, от общего числа искажений, возникающих в информационных разрядах (показателя γ_m) [5, 16]. Обратная к показателю γ_m величина в предельном случае равна $\frac{1}{\gamma_m} = 2^k$.

Отсюда следует, что для решения практических задач диагностики и синтеза цифровых устройств целесообразно использовать H_m -коды с малым числом контрольных разрядов и организовывать контроль вычислений по отдельным группам выходов устройств [5].

Утверждение 3. В пределе при $m \rightarrow \infty$ значение ϑ_m для H_m -кода с $k+q$ контрольными разрядами увеличивается в 2^q раз по сравнению со значением ϑ_m для H_m -кода с k контрольными разрядами.

Для доказательства указанного свойства найдем предел следующего выражения:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \varphi_{m,q} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{2^{k+q} - 1}{2^k - 1} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{(2^{k+q} - 1)'}{(2^k - 1)'} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{2^{k+q-1} \ln 2}{2^{k-1} \ln 2} = 2^q. \quad (8)$$

В частности, интересен граничный случай, когда рассматриваются H_m -коды с контрольными разрядами k и $k+1$ (например, H_m -коды со значениями $m = 26$ и 27 или $m = 57$ и 58).

Утверждение 4. В пределе при $m \rightarrow \infty$ значение ϑ_m для H_m -кода с $k+1$ контрольными разрядами увеличивается в два раза по сравнению со значением ϑ_m для H_m -кода с k контрольными разрядами.

В практических приложениях интерес представляет также учет свойств изменения числа необнаруживаемых ошибок при увеличении числа информационных разрядов. Возвращаясь к формулам (1)–(3), запишем отношения числа необнаруживаемых ошибок в кодовых словах кодов H_{m+p} и H_m (p — заданное натуральное число):

$$\delta_{m+p,m} = \frac{N_{m+p}}{N_m} = \frac{2^{m+p} (2^{m+p} - 1)}{2^m (2^m - 1)} = 2^p \frac{2^{m+p} - 1}{2^m - 1}; \quad (9)$$

$$\delta_{m+p,m}^D = \frac{N_{m+p}^D}{N_m^D} = \frac{2^{m+p} (2^{m+p-k} - 1)}{2^m (2^{m-k} - 1)} = 2^p \frac{2^{m+p-k} - 1}{2^{m-k} - 1}; \quad (10)$$

$$\delta_{m+k+p,m}^{DC} = \frac{N_{m+p}^{DC}}{N_m^{DC}} = \frac{2^{2(m+p)} (1 - 2^{-k})}{2^{2m} (1 - 2^{-k})} = 4^p. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что величина $\delta_{m+k+p,m}^{DC}$ не зависит от m . Ясно, что увеличение числа информационных разрядов в кодах Хэмминга на p приводит к увеличению числа необнаруживаемых ошибок в 4^p раз.

Устремив m к бесконечности, найдем, как в пределе изменяются величины $\delta_{m+p,m}$ и $\delta_{m+p,m}^D$:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \delta_{m+p,m} = \lim_{m \rightarrow \infty} 2^p \frac{2^{m+p} - 1}{2^m - 1} = 2^p \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{(2^{m+p} - 1)'}{(2^m - 1)'} = 2^p \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{2^{m+p-1} \ln 2}{2^{m-1} \ln 2} = 2^p 2^p = 4^p; \quad (12)$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \delta_{m+p,m}^D = \lim_{m \rightarrow \infty} 2^p \frac{2^{m+p-k} - 1}{2^{m-k} - 1} = 2^p \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{(2^{m+p-k} - 1)'}{(2^{m-k} - 1)'} = 4^p. \quad (13)$$

Из формулы (11), а также выражений (12), (13) следует такое свойство кодов Хэмминга.

Утверждение 5. В пределе при $m \rightarrow \infty$ число не обнаруживаемых H_{m+p} -кодом ошибок по всем видам превышает аналогичный показатель для H_m -кода в 4^p раз и не зависит от числа контрольных разрядов.

Утверждение 6. Для кодов Хэмминга с числом информационных разрядов, различающимся на единицу, вчетверо увеличивается число необнаруживаемых ошибок всех видов.

Таким образом, любое увеличение числа информационных разрядов в коде Хэмминга приводит к четырехкратному увеличению числа не обнаруживаемых кодом ошибок как в информационных векторах, так и одновременно в информационных и контрольных векторах. Эту особенность следует учитывать при выборе способа кодирования для синтеза цифровых устройств и вычислительных систем.

Особенности организации СВК с применением метода логического дополнения и контроля вычислений по кодам Хэмминга. Рассмотрим применение H_m -кодов при синтезе СВК для комбинационных составляющих цифровых устройств по методу логического дополнения [18, 19].

Структура организации СВК по данному методу изображена на рис. 2. В ней объектом диагностирования является устройство $F(x)$, снабженное выходами $f_1, f_2, \dots, f_{m+k-1}, f_{m+k}$. Неис-

правности, возникающие в устройстве $F(x)$, контролируются косвенно по результатам вычислений на его выходах. Этот контроль осуществляется с помощью СВК, в которой выделяются три функциональных блока. Блок контрольной логики $G(x)$, снабженный в общем случае выходами $g_1, g_2, \dots, g_{m+k-1}, g_{m+k}$, формирует контрольные функции дополнения для преобразования информационных функций $f_1, f_2, \dots, f_{m+k-1}, f_{m+k}$ в функции $h_1, h_2, \dots, h_{m+k-1}, h_{m+k}$, соответствующие на каждой входной комбинации разрядам кодовых слов заранее выбранного избыточного кода. Преобразование осуществляется с применением блока коррекции сигналов, включающего в себя в общем случае $m+k$ двухвходовых элементов сложения по модулю $M = 2$ (элементов XOR), по формуле: $h_i = f_i \oplus g_i, i = \overline{1, m+k}$. Блок TSC (*totally self-checking checker*) представляет собой тестер выбранного кода. Он, как „последний сторож“, реализуется полностью самопроверяемым и снабжается двумя выходами z^0 и z^1 , на которых формируется парафазный сигнал $\langle 01 \rangle$ или $\langle 10 \rangle$. Нарушение парафазности свидетельствует о наличии неисправностей блока $F(x)$, элементов СВК или сбоев на линиях схем.

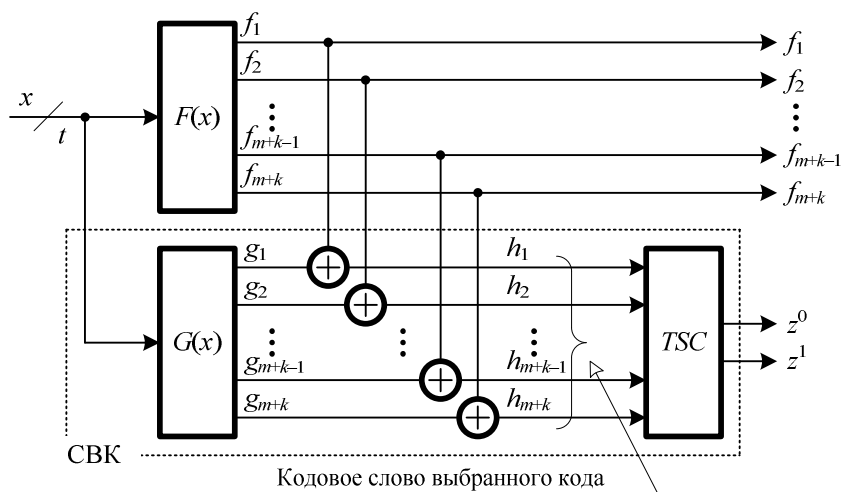


Рис. 2

Представленная на рис. 2 структура является обобщенной. Для ее построения может быть выбран любой равномерный избыточный код. При этом возможна реализация блока $G(x)$ с уменьшенным числом выходов. К примеру, в [25] при использовании классических кодов Бергера с $m = 3$ и $k = 2$ предлагается делить выходы устройства $F(x)$ на группы по пять в каждой, два из которых преобразовывать, а три напрямую подключать на входы тестера. В [26] эта идея развита для применения кодов Бергера и Боуза—Лина с произвольным числом информационных разрядов. Таким образом, при использовании разделимых кодов, таких как H_m -код в СВК, можно корректировать только k рабочих функций. Это потребует k элементов XOR в блоке коррекции сигналов.

Приведем примеры использования особенностей обнаружения ошибок H_m -кодами при синтезе СВК по методу логического дополнения.

Пример 1. Дано устройство $F(x)$ с 17 выходами. Требуется организовать СВК по методу логического дополнения с применением кодов Хэмминга.

Возможно несколько вариантов решения этой задачи, рассмотрим два из них (рис. 3, a — вариант организации СВК на основе H_{12} -кода; b — на основе H_{11} -кода).

Первый вариант предполагает контроль вычислений по всем выходам устройства $F(x)$ на основе H_{12} -кода. Любые 12 выходов устройства $F(x)$ будут соответствовать информационным разрядам, и оставшиеся 5 выходов — контрольным разрядам H_{12} -кода. Для простоты на рисунках представлены варианты последовательного выделения сначала групп выходов, соответствующих информационным разрядам, а затем — групп выходов, соответствующих контрольным разрядам. При этом будем полагать, что каждый выход с порядковым номером $2^j, j \in \mathbb{N}$, в выделяемой группе выходов устройства $F(x)$ будет соответствовать контрольному разряду H_m -кода в СВК (именно эти позиции в кодовых словах кодов Хэмминга отводятся

для контрольных разрядов [1]). Таким образом, устройство $G(x)$ будет снабжено пятью выходами, в блоке коррекции сигналов будет использовано пять элементов XOR.

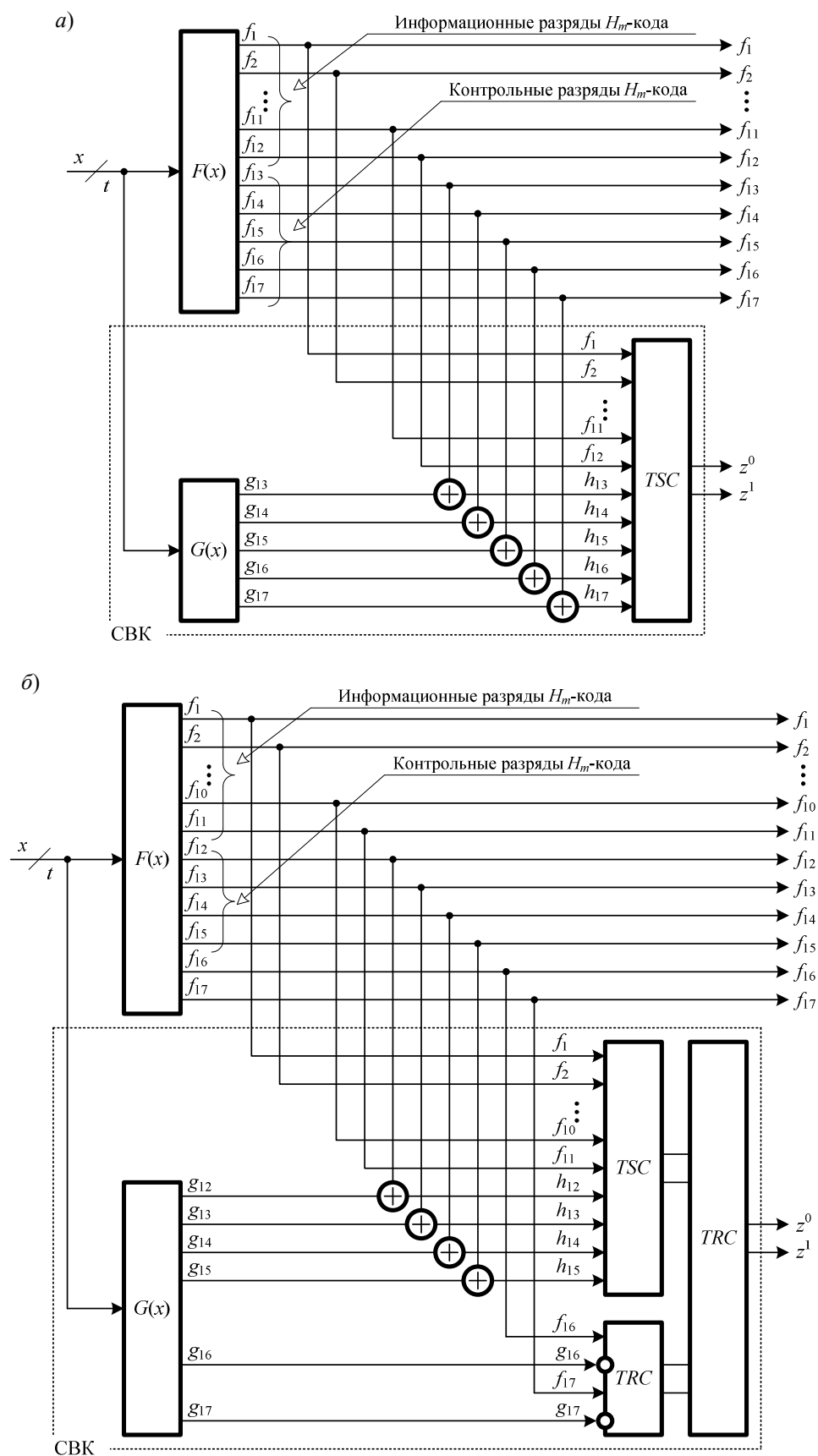


Рис. 3

Учитывая особенности H_m -кодов (см. табл. 1 и утверждение 4), организуем СВК по второму варианту на основе H_{11} -кода. Данный код будет обнаруживать в общем случае вдвое большее количество ошибок на выходах, а также иметь на один контрольный разряд меньше, чем H_{12} -код. Таким образом, 11 выходов блока $F(x)$ будут соответствовать информационным разрядам, следующие 4 — контрольным разрядам H_{11} -кода. Два оставшихся разряда в СВК продублируем с предварительным инвертированием для использования в структуре схем сжатия парафазных сигналов (элементов TRC — *two-rail checkers*) [27, 28].

Второй вариант организации СВК предполагает наличие шести выходов у блока $G(x)$. Кроме того, это требует применения дополнительно двух элементов TRC . Однако в пользу именно этого варианта организации СВК говорит следующее. Во-первых, при использовании логического дополнения функции, описывающие выходы блока $G(x)$, можно оптимизировать и делать достаточно простыми, поэтому блоки контрольной логики в каждой из СВК могут оказаться соизмеримыми по сложности реализации, а для второго варианта можно построить более простой блок $G(x)$. Во-вторых, сложность элементов TRC невысока, они являются стандартными, а тестер H_{11} -кода проще тестера H_{12} -кода. В-третьих, число элементов преобразования во втором случае на единицу меньше; в-четвертых, при соизмеримой сложности самих СВК потенциальное число обнаруживаемых ошибок (на основании утверждения 4) уменьшается вдвое.

Пример 2. Дано устройство $F(x)$ с 45 выходами. Требуется организовать СВК по методу логического дополнения с применением кодов Хэмминга.

Здесь также возможно несколько вариантов решения поставленной задачи. Рассмотрим три из них, приведенные на рис. 4: *a* — контроль всех выходов на основе H_{39} -кода; *b* — контроль вычислений по двум группам выходов на основе кодов H_{25} и H_{11} ; *в* — контроль вычислений по трем группам выходов на основе H_{11} -кода.

Первый вариант основан на использовании H_{39} -кода для контроля вычислений по всем выходам устройства $F(x)$. 39 выходов объекта диагностирования в СВК не преобразуются, а 6 — преобразуются. Второй вариант организации СВК связан с выделением двух контролируемых групп выходов на основе кодов H_{25} и H_{11} . При этом 36 выходов объекта диагностирования в СВК напрямую подключаются к тестерам выбранных кодов, а 9 — после преобразования. Третий вариант организации СВК подразумевает выделение трех групп выходов с контролем каждой из них по H_{11} -коду. В этом случае 33 выхода объекта диагностирования не преобразуются, а 12 — преобразуются в СВК. Отметим также, что контроль вычислений по группам выходов подразумевает использование такого количества тестеров кодов, сколько групп выделено, а выходы тестеров объединяются на входах самопроверяемого компаратора, который может быть реализован на основе модулей TRC [29].

Отметим, что с ростом числа выделяемых групп выходов увеличивается и сложность технической реализации СВК. Посмотрим, как это влияет на характеристики обнаружения ошибок на выходах устройства $F(x)$. В табл. 2 приведены характеристики обнаружения ошибок на выходах устройства с 45 выходами. Сразу оговоримся, что речь идет о максимальном потенциальном числе ошибок, ведь на выходах реальных устройств с реальными структурами часть ошибок исключена. Однако приведенный пример показывает, как изменяются показатели обнаружения ошибок с выделением групп выходов.

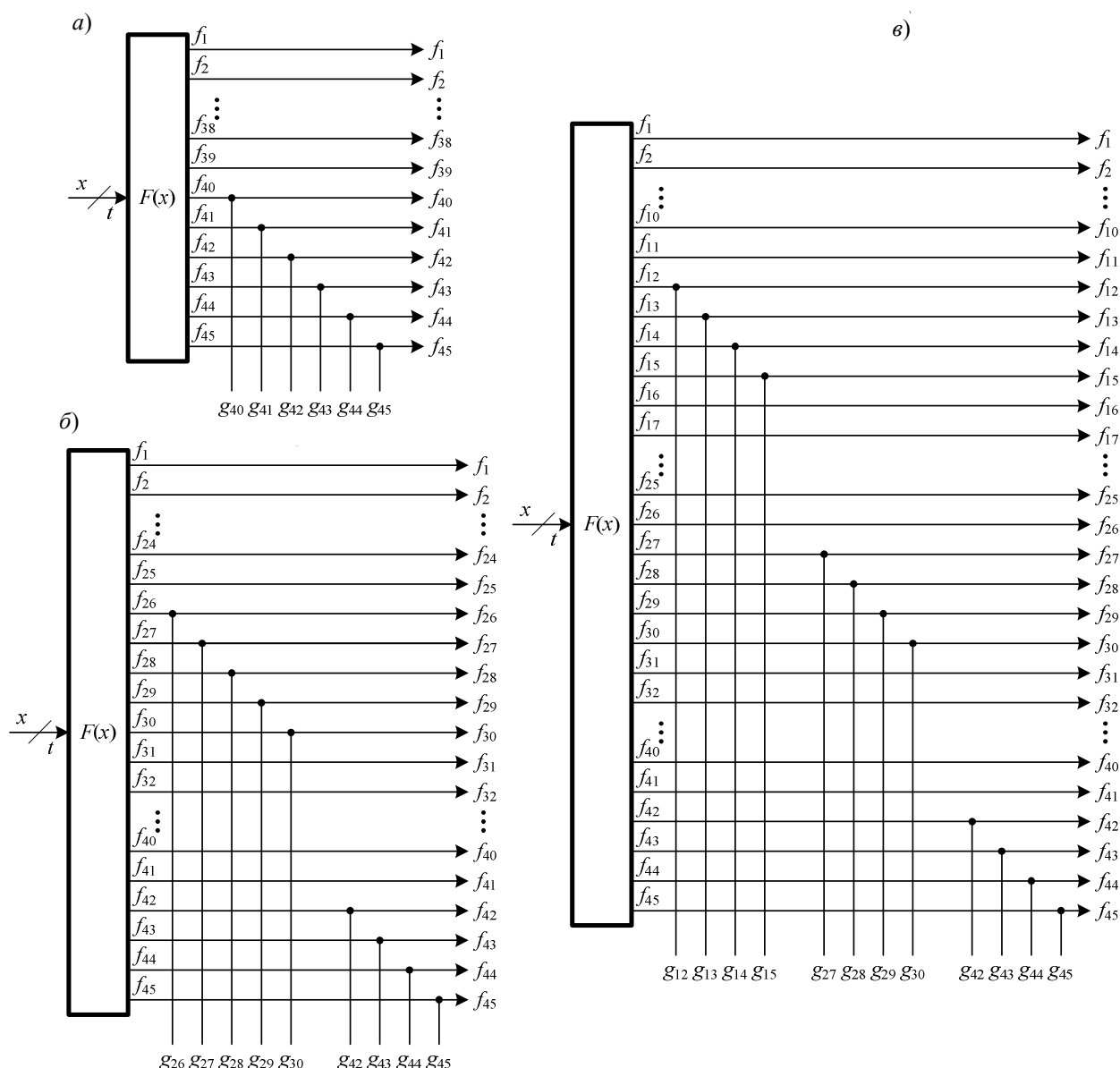


Рис. 4

Сравним второй и третий варианты организации СВК с первым. Число потенциальных необнаруживаемых ошибок при организации СВК по второму варианту сокращается в 268 435 463 раз по сравнению с первым вариантом! Число потенциальных необнаруживаемых ошибок при организации СВК по третьему варианту сокращается в $2,40309 \cdot 10^{16}$ раз по сравнению с первым вариантом!

Таблица 2

Обнаруживающие характеристики различных структур организации СВК

Вариант организации СВК	Применяемые коды	m	k	N_m	N_m^D	N_{m+k}^{DC}
I	H_{39}	39	6	$3,02231 \cdot 10^{23}$	$4,722 \cdot 10^{21}$	$2,975 \cdot 10^{23}$
ВСЕГО				$3,0223 \cdot 10^{23}$	$4,72 \cdot 10^{21}$	$2,98 \cdot 10^{23}$
II	H_{25}	25	5	$1,1259 \cdot 10^{15}$	$3,518 \cdot 10^{13}$	$1,091 \cdot 10^{15}$
II	H_{11}	11	4	4 192 256	260 096	3 932 160
ВСЕГО				$1,1259 \cdot 10^{15}$	$3,52 \cdot 10^{13}$	$1,09 \cdot 10^{15}$
III	H_{11}	11	4	4192256	260096	3 932 160
III	H_{11}	11	4	4192256	260096	3 932 160
III	H_{11}	11	4	4 192 256	260 096	3 932 160
ВСЕГО				12 576 768	780 288	11 796 480

Сравним третий вариант организации СВК со вторым. Число потенциальных необнаруживаемых ошибок сокращается в 89 522 195 раз!

Таким образом, при некотором увеличении сложности технической реализации (эту сложность трудно оценить без привязки к реальным структурам устройств $F(x)$) достигается колоссальное уменьшение числа потенциальных необнаруживаемых ошибок в СВК, организованной по методу логического дополнения.

Снизить сложность технической реализации СВК можно за счет уменьшения числа контрольных разрядов в кодах и рассмотрения таких кодов, которые вне зависимости от числа информационных разрядов имеют постоянное значение k . Если речь идет о разделимых кодах, обладающих свойством равномерности распределения информационных векторов между контрольными векторами, то полученные результаты для H_m -кодов будут справедливы. Однако из формулы (2) следует, что в таком случае число необнаруживаемых ошибок, возникающих только в информационных разрядах, с ростом значения m будет также возрастать, а вот количество необнаруживаемых ошибок, возникающих как в информационных, так и в контрольных разрядах, наоборот, снижаться, по сравнению с H_m -кодами. Другими словами, будет иное перераспределение ошибок между разрядами. Из формулы (7) имеем следующие результаты (табл. 3).

Таблица 3
Предельные значения показателя ϑ_m

k	$\lim_{m \rightarrow \infty} \vartheta_m$
1	1
2	3
3	7
4	15
5	31

Кодами с постоянным значением k вне зависимости от значения m не будет обнаруживаться больше ошибок в кодовых словах, чем H_m -кодами. При этом будет наблюдаться меньшая разница между числом необнаруживаемых ошибок, возникающих и в информационных, и в контрольных разрядах, и числом необнаруживаемых ошибок, возникающих только в информационных разрядах. Иными будут и распределения необнаруживаемых ошибок по кратностям. Эти факты следует учитывать при уменьшении сложности технической реализации СВК за счет применения иных оптимальных кодов.

Также существует способ снижения числа необнаруживаемых ошибок за счет исключения возникающих одновременно искажений информационных и контрольных разрядов [26]. Для этого осуществляется определенный подбор выходов объекта диагностирования, которые преобразуются в СВК — они должны образовывать группу выходов, не зависящих от других выходов. Учитывая значения показателя ϑ_m для H_m -кодов, можно сделать вывод, что такое выделение групп выходов позволяет существенно сократить число необнаруживаемых ошибок. Это, однако, можно сделать не для любых устройств. Тем не менее, даже наличие одного или нескольких зависимых выходов в преобразуемой группе снижает число потенциальных необнаруживаемых ошибок.

Заключение. Выбор классических кодов Хэмминга на этапе синтеза цифровых устройств и вычислительных систем позволяет наделять структуры последних свойствами контролепригодности, самопроверяемости и отказоустойчивости. При этом целесообразно в полной мере учитывать свойства обнаружения ошибок кодами Хэмминга: как отдельно в информационных разрядах, установленные в [5, 15—17], так и одновременно возникающие в информационных и контрольных разрядах. Для последнего случая в настоящей работе установлены некоторые особенности кодов Хэмминга. Приведенные примеры учета свойств

обнаружения ошибок кодами Хэмминга убедительно показывают эффективность их применения при организации СВК по методу логического дополнения.

Следует отметить, что по формуле (2) подсчитывается и общее число обнаруживаемых ошибок в любом разделимом коде, обладающем свойством равномерности распределения информационных векторов между контрольными векторами (оптимальном коде по критерию минимума общего количества обнаруживаемых ошибок при заданных значениях m и k) [22, 23]. Поэтому полученные в настоящей статье результаты могут использоваться и при организации СВК по методу логического дополнения с иными оптимальными кодами. Тем не менее, следует отметить, что коды Хэмминга обладают хорошими характеристиками обнаружения ошибок в области малой их кратности, что оставляет приоритет использования их на практике [5].

В качестве не недостатка, но особенности кодов Хэмминга отметим то, что они не являются кодами с обнаружением каких-либо отдельных видов ошибок в словах (например, любых монотонных, или однонаправленных). Это требует при синтезе полностью самопроверяемых СВК выделения H^r -независимых (r — число допустимых одновременно искажаемых выходов) групп выходов с отдельным их контролем по кодам Хэмминга [5]. Учет установленных в настоящей статье свойств кодов Хэмминга окажется полезным при синтезе СВК для цифровых устройств, а также при разработке автоматизированных средств проектирования логических схем.

В качестве дальнейших перспектив можно отметить возможность анализа возникающих в кодовых словах ошибок с классификацией их по кратностям (числу искажаемых разрядов), а также по видам (по числу сочетаний искажений нулевых и единичных разрядов) [22, 23].

Коды Хэмминга могут эффективно использоваться не только для синтеза отказоустойчивых структур цифровых устройств, но и для реализации технических средств их диагностирования. В том числе интересным может оказаться их применение в тех приложениях, где требуется оперативное обнаружение неисправностей [30].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hamming R. W.* Error Detecting and Correcting Codes // *Bell System Technical Journal*. 1950. Vol. 29, N 2. P. 147—160.
2. *Peterson W. W.* Error-Correcting Codes. NY: Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, 1961. 285 p.
3. *MacWilliams F. J., Sloane N. J. A.* The Theory of Error-Correcting Codes. Amsterdam: North-Holland, 1977. 785 p.
4. *Hamming R. W.* Coding and Information Theory. NY: Prentice-Hall, 1986. 272 p.
5. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств. СПб: Наука, 2018. 151 с.
6. *Лисенков В. М., Бестемьянов П. Ф., Леушин В. Б., Лисенков А. В., Ванышин А. Е.* Системы управления движением поездов на перегонах: учеб. для вузов ж.-д. транспорта в 3 ч. Ч. 2. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. 324 с.
7. *Nikitin D., Manakov A., Nikitin A., Popov P., Kotenko A.* Automatic Locomotive Signalization System Modification with Weight-Based Sum Codes // *Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 332—336. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110099.
8. *Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y.* Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications // *Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 25—28. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
9. *Ojiganov A. A.* The Use of Hamming Codes in Digital Angle Converters Based on Pseudo-Random Code Scales // *Measurement Techniques*. 2015. Vol. 58, is. 5. P. 512—519. DOI: 10.1007/s11018-015-0746-7.
10. *Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.

11. *Telpukhov D. V., Zhukova T. D.* New Metric for Evaluating the Effectiveness of Redundancy in Fault-Tolerant Logic Circuits // Proc. of 19th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2021). Batumi, Georgia, 10—13 September 2021. P. 355—360. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581027.
12. *Гаврилов С. В., Гуров С. И., Тельпухов Д. В., Жукова Т. Д.* Использование информационной избыточности при построении сбоеустойчивых комбинационных схем // Таврический вестник информатики и математики. 2018. № 2(39). С. 29—44.
13. *Тельпухов Д. В., Деменева А. И., Жукова Т. Д., Хрущев Н. С.* Исследование и разработка систем автоматизированного проектирования схем функционального контроля комбинационных логических устройств // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2018. № 1(169). С. 15—22.
14. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Гессель М.* Самодвойственные дискретные устройства. СПб: Энергоатомиздат, 2001. 331 с.
15. *Ефанов Д. В.* Предельные свойства кода Хэмминга в схемах функционального диагностирования // Информатика и системы управления. 2011. № 3. С. 70—79.
16. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Blyudov A.* Analysis of Error-Detection Possibilities of CED Circuits Based on Hamming and Berger Codes // Proc. of 11th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2013). Rostov-on-Don, Russia, 27—30 September 2013. P. 200—207. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673097.
17. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Особенности применения кодов Хэмминга при организации самопроверяемых схем встроенного контроля // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 1. С. 47—59. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-1-47-59.
18. *Гессель М., Морозов А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 167—176.
19. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008. 184 p.
20. *Efanov D., Osadchy G., Zueva M.* Specifics of Error Detection with Modular Sum Codes in Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Complement Method // Proc. of 19th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2021). Batumi, Georgia, 10—13 September 2021. P. 59—69. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581036.
21. *Efanov D., Osadchy G., Zueva M.* Special Aspects of Errors Definition via Sum Codes within Embedded Control Schemas Being Realized by Means of Boolean Complement Method // Proc. of 11th IEEE Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021). Vol. 1. Cracow, Poland, 22—25 September 2021. P. 424—431. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660837.
22. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1. Классические коды Бергера и их модификации. М.: Наука, 2020. 383 с.
23. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2. Взвешенные коды с суммированием. М.: Наука, 2021. 455 с.
24. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Dmitriev V.* Weighted Sum Code without Carries – is an Optimum Code with Detection of Any Double Errors in Data Vectors // Proc. of 14th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2016). Yerevan, Armenia, 14—17 October 2016. P. 134—141. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807686.
25. *Morozov M., Saposhnikov V. V., Saposhnikov Vl. V., Goessel M.* New Self-Checking Circuits by Use of Berger-Codes // Proc. of 6th IEEE Intern. On-Line Testing Workshop. Palma de Mallorca, Spain, 3—5 July 2000. P. 171—176.
26. *Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V.* The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose-Lin Codes with the Modulo Value $M=4$ // Electronic Modeling. 2021. Vol. 43, is. 1. P. 28—45. DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
27. *Nikolos D.* Self-Testing Embedded Two-Rail Checkers // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1998. Vol. 12, is. 1-2. P. 69—79. DOI: 10.1023/A:1008281822966.
28. *Lala P. K.* Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 216 p.
29. *Huches J. L. A., McCluskey E. J., Lu D. J.* Design of Totally Self-Checking Comparators with an Arbitrary Number of Inputs // IEEE Transactions on Computers. 1984. Vol. C-33, N 6. P. 546—550.

30. Drozd O., Sachenko A., Hiromoto R., Zashcholkin K., Drozd M. Particularities of Sync Monitoring in FPGA Components of Safety-Related Systems // Proc. of 11th IEEE Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021). Vol. 2. Cracow, Poland, 22–25 September 2021. P. 979–983. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660928.

Сведения об авторе

Дмитрий Викторович Ефанов

— д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Высшая школа транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта; профессор; Российский университет транспорта, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте; профессор;
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.03.22; одобрена после рецензирования 31.03.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Hamming R.W. *Bell System Technical Journal*, 1950, no. 2(29), pp. 147–160.
2. Peterson W.W. *Error-Correcting Codes*, NY, Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, 1961, 285 p.
3. MacWilliams F.J., Sloane N.J.A. *The Theory of Error-Correcting Codes*, Amsterdam, North-Holland, 1977, 785 p.
4. Hamming R.W. *Coding and Information Theory*, NY, Prentice-Hall, 1986, 272 p.
5. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. *Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv* (Hamming Codes in Logic Devices Functional Control Systems), St. Petersburg, 2018, 151 p. (in Russ.)
6. Lisenkov V.M., Bestem'yanov P.F., Leushin V.B., Lisenkov A.V., Van'shin A.E. *Sistemy upravleniya dvizheniem poezdov na peregonakh* (Control Systems of Train Service on Stages), Moscow, 2009, 324 p. (in Russ.)
7. Nikitin D., Manakov A., Nikitin A., Popov P., Kotenko A. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 332–336, DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110099.
8. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 25–28, DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
9. Ojiganov A.A. *Measurement Techniques*, 2015, no. 5(58), pp. 512–519, DOI: 10.1007/s11018-015-0746-7.
10. Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivye sistemy* (The Self-Checked Devices and Failure-Safe Systems), Moscow, 1989, 208 p. (in Russ.)
11. Telpukhov D.V., Zhukova T.D. *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 355–360, DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581027.
12. Gavrilov S.V., Gurov S.I., Telpukhov D.V., Zhukova T.D. *Taurida Journal of Computer Science Theory and Mathematics*, 2018, no. 2(39), pp. 29–44. (in Russ.)
13. Telpukhov D.V., Demeneva A.I., Zhukova T.D., Khrushchev N.S. *Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics*, 2018, no. 1(169), pp. 15–22. (in Russ.)
14. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Gessel M. *Samodvoystvennyye diskretnyye ustroystva* (Self-Dual Discrete Devices), St. Petersburg, 2001, 331 p. (in Russ.)
15. Efanov D.V. *Information Science and Control Systems*, 2011, no. 3, pp. 70–79. (in Russ.)
16. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Efanov D., Blyudov A. *Proceedings of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013)*, Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013, pp. 200–207, DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673097.
17. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 1(61), pp. 47–59, DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-1-47-59. (in Russ.)
18. Gessel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Automation and Remote Control*, 2003, no. 1(64), pp. 153–161, DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021884727370>.
19. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking*, Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
20. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 59–69, DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581036.
21. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. *Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021)*, Vol. 1, Cracow, Poland, September 22–25, 2021, pp. 424–431, DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660837.
22. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 1. Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii* (Summed Codes for Technical Diagnostic Systems. Vol. 1. Classical Berger Codes and Their Modifications), Moscow, 2020, 383 p. (in Russ.)
23. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 2. Vzveshennyye kody s summirovaniyem* (Summed Codes for Technical Diagnostic Systems. Vol. 2. Weighted Codes with Summation), Moscow, 2021, 455 p. (in Russ.)
24. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Efanov D., Dmitriev V. *Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Sym-*

- posium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016, pp. 134–141, DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807686.
25. Morozov M., Saposhnikov V.V., Saposhnikov V.I., Goessel M. *Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop*, Palma de Mallorca, Spain, July 3–5, 2000, pp. 171–176.
26. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Electronic Modeling*, 2021, no. 1(43), pp. 28–45, DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
27. Nikolos D. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 1–2(12), pp. 69–79, DOI: 10.1023/A:1008281822966.
28. Lala P.K. *Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
29. Huches J.L.A., McCluskey E.J., Lu D.J. *IEEE Transactions on Computers*, 1984, no. 6(C-33), pp. 546–550.
30. Drozd O., Sachenko A., Hiromoto R., Zashcholkina K., Drozd M. *Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021)*, Vol. 2, Cracow, Poland, September 22–25, 2021, pp. 979–983, DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660928.

Data on author**Dmitry V. Efanov**

— Dr. Sci., Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materials, and Transport; Higher School of Transport; Professor; Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control, and Communications on Railway Transport; Professor; E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Received 23.03.22; approved after reviewing 31.03.22; accepted for publication 27.12.22.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТИ

А. Ю. КУЛАКОВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
Санкт-Петербург, Россия
russ69@bk.ru*

Аннотация. Рассмотрены подходы к формулировке и решению задачи выбора конфигурации бортового комплекса космического аппарата (КА), обеспечивающего проведение автономной реконфигурации КА. Выделено два направления решения таких задач: на основе формализации марковского процесса принятия решений (Markov decision process, MDP) и с использованием динамического программирования и машинного обучения, и на основе учета структурно-функциональных зависимостей элементов бортового комплекса управления КА (бортовой аппаратуры) с применением общего логико-вероятностного подхода (включая машинное представление схемы функциональной целостности) и теории структурной динамики сложных систем. Подход на основе MDP представлен зарубежными авторами, которые рассматривают реконфигурацию в контексте планирования сеансов целевой аппаратуры КА. Подход на основе структурно-функциональных зависимостей формулируется, прежде всего, как синтез нового структурного состояния КА после возникновения отказа. При этом как отечественные, так и зарубежные авторы, независимо друг от друга приходят к специфической постановке задачи выбора конфигурации бортового комплекса, предполагая при этом, что выбор необходимой рациональной конфигурации осуществляется в заданных режимах функционирования КА условиях.

Ключевые слова: структурно-функциональная реконфигурация, марковский процесс принятия решений, искусственные нейронные сети, вероятностный полином, живучесть, космические аппараты, бортовая аппаратура, система управления движением

Благодарности: исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 20-08-01046) в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Кулаков А. Ю. Выбор оптимальной конфигурации бортового комплекса космического аппарата для восстановления его работоспособности // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 100—111. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-100-111.

CHOOSING THE OPTIMAL CONFIGURATION OF THE ONBOARD COMPLEX OF THE SPACECRAFT TO RESTORE ITS OPERABILITY

A. Yu. Kulakov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
russ69@bk.ru*

Abstract. Approaches to formulation and solution of the problem of choosing the configuration of spacecraft onboard equipment, which ensures autonomous reconfiguration of the spacecraft, are considered. Two directions for solving such problems are singled out: based on the formalization of the Markov decision process (MDP) and using dynamic programming and machine learning, and on the basis of account for structural and functional dependencies of the spacecraft onboard control complex (onboard equipment) elements with application of general logical-probabilistic approach (including machine representation of functional integrity scheme) and the theory of structural dynamics of complex systems. The MDP-based approach is presented by foreign authors who consider reconfiguration in the context of scheduling sessions of the target spacecraft equipment. The approach based on structural-functional dependencies is formulated, first of all, as a synthesis of a new structural state of the spacecraft after a failure occurs. At the same time, both domestic and foreign authors, independently of each other, come to a specific formulation of the problem of choosing the configuration of onboard equipment, while assuming that the choice of the necessary rational configuration is carried out under specified conditions, defined as the required modes of functioning of the spacecraft and the limitations associated with them.

Keywords: structural-functional reconfiguration, Markov decision process, artificial neural networks, probabilistic polynomial, survivability, spacecraft, onboard equipment, motion control system

Acknowledgment: the studies performed on this topic were carried out with the partial financial support of the RFBR grant (No. 20-08-01046) within the framework of the budget topic FFZF-2022-0004.

For citation: Kulakov A. Yu. Choosing the optimal configuration of the onboard complex of the spacecraft to restore its operability. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 100—111 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-100-111.

Введение. Задача выбора конфигурации бортового комплекса (БК) для восстановления работоспособности космического аппарата (КА) является одной из наиболее актуальных, решаемых в ходе реализации технологий отказоустойчивого управления. Далее процесс восстановления работоспособности будем называть реконфигурацией БК КА. Под бортовым комплексом будем понимать как комплекс управления в целом, так и отдельные бортовые системы (или их совокупность), а под элементами БК — бортовую аппаратуру. Также следует отметить, что в зарубежной литературе термин „реконфигурация“ имеет более широкое толкование, являясь синонимом обобщенного понятия FDIR (fault detection, isolation and recovery), которое переводится как „обнаружение неисправностей, локализация и восстановление“ [1].

Важно разделить подходы и методы отказоустойчивого управления, основанные на непрерывных моделях и теории автоматического управления (пусть и с применением таких методов искусственного интеллекта, как нечеткая логика или машинное обучение), а также подходы и методы планирования реконфигурации, основанные на моделях и теории искусственного интеллекта, общем логико-вероятностном методе, теории структурной динамики сложных систем, методах и моделях динамического программирования и машинного обучения.

Методы отказоустойчивого управления, основанные на непрерывных моделях и теории автоматического управления, фокусируются на разработке отказоустойчивых регуляторов/контроллеров [2]. Разработка таких регуляторов/контроллеров связана либо с управлением КА, при формировании которого учитывается параметрическая неопределенность основных характеристик БК, либо с доработкой штатных регуляторов при возникновении неисправности.

Как правило, концептуальная постановка задачи планирования реконфигурации БК КА сводится к следующему. *Дано:* конечное множество всех возможных состояний КА и его БК, множества их начальных и конечных состояний, множество возможных управляющих воздействий (в зависимости от текущего состояния БК КА). *Требуется найти* последовательность управляющих воздействий, которая переводит БК КА из начального (начальных) в заданное состояние (состояния) [3]. Важной составной частью задачи планирования реконфигурации является выбор рабочей конфигурации БК.

Анализ текущего состояния выбора рабочей конфигурации БК. В ряде исследований зарубежные специалисты решают задачу выбора рабочей конфигурации БК в рамках предложенного ими формализма (модели) марковского процесса принятия решений (Markov decision process, MDP), применяя методы (адаптивного) динамического программирования и обучения с подкреплением [4].

В работе [5] выбор оптимальной конфигурации БК представлен как часть решения более общей задачи планирования работы научной аппаратуры КА на основе MDP. На содержательном уровне соответствующая модель описана в рамках следующих допущений: миссия КА предполагает решение множества задач; в результате решения каждой задачи соответствующая цель может быть достигнута либо не достигнута; каждое действие имеет два состояния (выполняется/не выполняется); бортовые системы (или БК) имеют встроенную диагностику неисправностей; в качестве показателей работоспособности элементов БК используются либо вероятности возникновения неисправностей, либо обобщенные значения показаний датчиков (на основе которых указанные вероятности могут быть рассчитаны); управляющие воздействия по реконфигурации реализуются мгновенно.

Технология использования MDP для решения задачи планирования работы научной аппаратуры определяется с учетом: состояния выполнения задач миссии и действий, информации, генерируемой системой диагностики, вероятности правильности определения неисправности БК, текущей конфигурации БК и закона управления элементами БК (исполнительных органов). Действия могут включать в себя либо выбор конкретной конфигурации БК и соответствующего закона управления (ЗУ), либо отсутствие каких-то действий.

В работе [5] описано решение задачи планирования реконфигурации на примере КА FUSE, в состав БК которого входят: четыре двигателя-маховика (ДМ), две сборки трехосевых измерительных гироскопов, трех электромагнитов и трехосевых магнитометров (магнитная система), однокоординатных и двухкоординатных датчиков Солнца и полезной нагрузки. В задаче рассматривается только реконфигурация ДМ (при совместной работе с магнитной системой) и гироскопов. При этом из-за большой размерности MDP задача разбивается на две: одна — для ДМ и их ЗУ, другая — для гироскопов. Далее приводится описание состояния MDP для реконфигурации ДМ. Также используется упрощение, что ЗУ однозначно определяют конфигурацию ДМ (четыре закона управления с тремя ДМ, шесть ЗУ с двумя ДМ и четыре ЗУ с одним ДМ, при управлении на одном ДМ также задействуется магнитная система).

Функция вознаграждения определяется для подсистемы ДМ следующим образом. Учитываются штрафы за использование менее эффективного ЗУ для каждой из целей миссии (менее эффективным считается ЗУ, использующий меньшее количество ДМ) и приоритет целей. Также устанавливаются штрафы за использование ДМ с признаком неисправности и неиспользование ДМ с признаком исправности. Подробности описания функции вознаграждения приведены в [5]. В рамках этого примера авторы упростили формулировку решения задачи планирования реконфигурации: чтобы найти оптимальную технологию реконфигурации БК КА, необходимо выбирать действие (управляющее воздействие), приносящее максимальный выигрыш с точки зрения показателя качества управления КА, а также исходя из текущего состояния БК КА при переводе его в следующее требуемое (возможное) состояние.

Другие зарубежные авторы [6] рассматривают задачу выбора конфигурации БК КА на основе планирования работы исполнительных органов системы управления движением КА с комбинированным использованием адаптивного динамического программирования (adaptive dynamic programming) и искусственных нейронных сетей (artificial neural networks). Содержательную постановку такой задачи авторы описывают следующим образом. Дана система управления движением, которая обеспечивает перевод КА в требуемую ориентацию до окончания сеанса целевой аппаратуры (СЦА), интервалы СЦА не перекрываются, каждый сеанс имеет требования по точности ориентации и стабилизации, условия выполнения сеансов не связаны между собой, для каждого сеанса заданы приоритет и ограничение на энергопотребление исполнительных органов в СЦА.

Технология использования MDP для планирования работы исполнительных органов КА определяется с учетом: текущего углового положения КА, текущей конфигурации БК, реализуемого СЦА, информации о сбое/отказе элемента БК. Действия включают: переключение конфигурации БК, переориентацию КА, реализацию СЦА, „холостой ход“ (действия не выполняются) и переход в безопасный режим.

С учетом вышеизложенного задача планирования в [6] была представлена в следующем виде. *Дано:* множество запланированных СЦА и доступных конфигураций БК КА. Необходимо принять решения, следует ли реконфигурировать БК КА, как их реконфигурировать и как оптимизировать показатели производительности КА после сбоя/отказа БК. Таким образом, *необходимо найти:* 1) подмножество СЦА для их последующей реализации; 2) оптимальную технологию реконфигурации, на основе которой может быть найдена последовательность действий, обеспечивающих перенастройку управления КА для успешного завершения сеансов, а также максимизацию показателя общей производительности БК КА в ходе выполнения серии СЦА и минимизацию возможных затрат энергии на выполнение реконфигурации.

Для оценки действий по переориентации КА были получены аналитические зависимости по времени переориентации, энергетическим затратам и приращению кинетического момента. Входными данными для решения задачи оценивания этих параметров являются: моменты инерции КА, управляющий момент ДМ, скорость переориентации, начальное и заданное угловые положения, матрица установки ДМ, максимальный кинетический момент ДМ.

Для планирования реконфигурации исполнительных органов в [6] применяется Q-обучение. Традиционно конструкции, использующиеся в адаптивном динамическом программировании, базируются на нейронной сети действий и сети „критиков“ (учителей). Подход, предложенный в [7], содержит две сети „критиков“, сеть СЦА и сеть, описывающую энергетические затраты. При реализации такого подхода (рис. 1) используются две сети СЦА и две сети энергозатрат, модуль кодирования состояния-действия, алгоритм выбора оптимального действия и переход состояния.

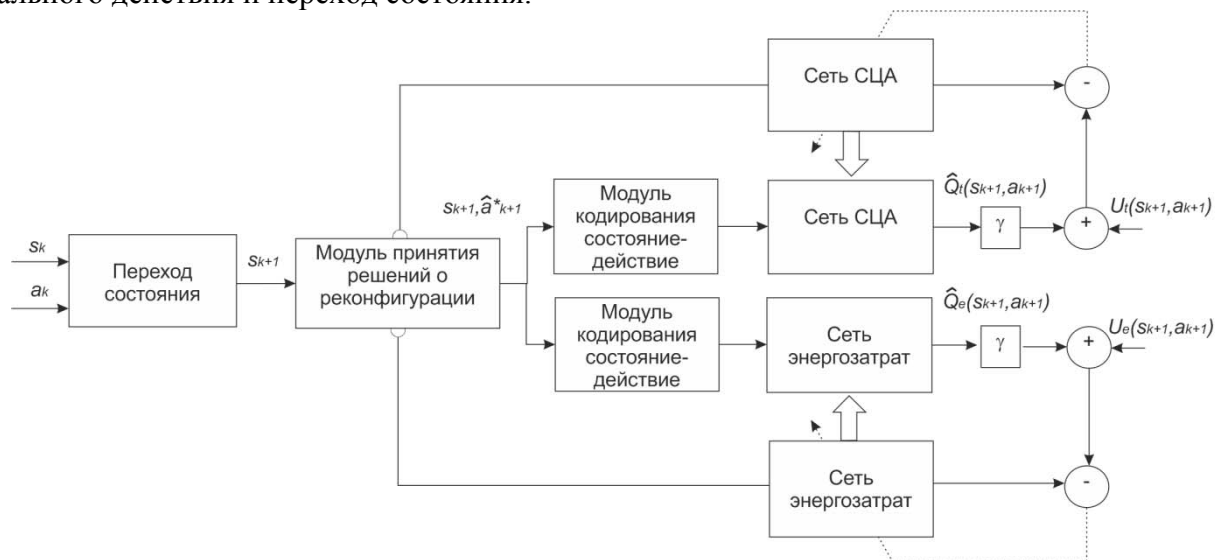


Рис. 1

Сеть СЦА используется для оценки показателя $Q_t(s_k, a_k)$, а результат ее работы — для оценки показателя $\hat{Q}_t(s_k, a_k)$. Сеть энергозатрат используется для оценки показателя $Q_e(s_k, a_k)$, результат ее работы — для оценки показателя $\hat{Q}_e(s_k, a_k)$. Поскольку состояния s_k и действия a_k содержат как непрерывные, так и дискретные переменные, авторы используют модуль кодирования состояния-действия с целью их перевода в двоичную форму, служащую входными данными для двух перечисленных сетей. Модуль принятия решения о реконфигурации используется для получения оценки оптимального действия $\hat{a}_k^*$ при заданном состоянии s_k . С помощью модуля принятия решения о реконфигурации оценивается оптимальное действие для перехода из *текущего* состояния БК КА в возможное либо требуемое. Для итеративного обучения нейронных сетей принят двухкритериальный алгоритм, значения его выходных переменных при заданной паре „действие—состояние“ должны итерационно сходиться и обеспечивать максимизацию показателя качества управления СЦА, а также минимизацию общих энергетических затрат на управление элементами БК КА.

Отечественные исследователи предлагают иной подход. Так, в работе [8] решение соответствующей задачи не связано напрямую с управлением реконфигурацией на борту КА, а ориентировано на обоснование выбора состава БК на этапе проектирования с точки зрения требований, предъявляемых к значениям показателей живучести малых КА. В работе [9] авторы предложили использовать методику, применяемую при проектировании КА для выбора конфигурации на этапе летной эксплуатации.

Показатель живучести определяется как отношение эффективности БК КА после возникновения последовательности отказов на протяжении времени T_{AC} к эффективности в начальный момент времени. Эффективность функционирования КА определяется с учетом вероятности нахождения КА и элементов его БК в возможных состояниях и показателя эффективности выполнения конкретной целевой задачи в этих состояниях. Состояния КА определяются через состояния элементов БК (работоспособен/неработоспособен). Для решения каждой задачи (функции) задается определенная конфигурация БК, которая имеет свой показатель эффективности выполнения задачи (функции).

В качестве исходных данных для каждого элемента БК КА задается перечень функций, при выполнении которых она может быть использована, а также рассчитывается коэффициент эффективности ее применения, который нормируется в интервале от 0 до 1.

В работах [8, 9] рассматриваются следующие варианты задания исходных данных для БК малых КА: (1) аддитивный вариант — функция БК КА выполняется хотя бы одним из ее элементов, коэффициенты эффективности суммируются („горячий“ резерв); (2) замещающий вариант — одним из работоспособных элементов, имеющих наибольший коэффициент эффективности („холодный“ резерв); (3) совместный вариант — функция выполняется всеми элементами одновременно, коэффициенты эффективности перемножаются.

Для этапа проектирования предложен следующий алгоритм выбора конфигурации БК КА, основанный на оптимизации показателя ее живучести. Для выполнения любой функции определяется способ реализации КА в зависимости от множества элементарных функций, которые выполняет вся БК. При проектировании состава БК малого КА может быть целенаправленно синтезирована функциональная избыточность, при которой какой-либо задаче (функции) аппарата сопоставляется более одного способа ее решения (реализации).

Наличие нескольких способов решения задачи позволяет в случае нештатной ситуации производить эмуляцию отсутствующих элементарных функций (которые выполнял отказавший элемент), таким образом, используется уже новая конфигурация БК. Принимая во внимание возможную неоднозначность выбора эквивалентного функционального соответствия конфигурации БК (или байпаса — в терминологии подхода, рассмотренного в [10]), необходимо решить задачу оптимального выбора конфигураций БК, определив перечень эквивалентных конфигураций для каждого алгоритма. В этом случае первым критерием оптимизации является минимальное снижение показателя эффективности функционирования КА по отношению к его начальному значению. Если две конфигурации БК КА позволяют достичь одинаковой эффективности функционирования, необходимо выбрать конфигурацию с меньшим значением потребляемой электроэнергии. Таким образом, для каждого алгоритма перечень эквивалентных конфигураций будет ранжирован по заданным критериям.

Примеры реализации изложенного алгоритма представлены в работах [8] — выбор конфигурации БК КА при проектировании, [9] — обеспечение живучести на этапе эксплуатации КА. Следует отметить, что зарубежные авторы [5, 7] описывают задачи реконфигурации БК КА в формулировках MDP, применяя методы решения, распространенные в динамическом программировании и „машинном обучении“. При этом либо вообще не акцентируется внимание на структурно-функциональных связях элементов БК, либо их учитывают в достаточно агрегированном виде. Более того, недостатком подхода, основанного на MDP, можно считать „проклятие размерности“ даже для небольших систем, состоящих, например, только из гироскопов и двигателей-маховиков. Положительной стороной такого подхода является изначальная постановка не задачи о „ранце“, а задачи планирования. Оригинальный подход на основе MDP, в рамках которого возможно объединить методы планирования реконфигурации с методами отказоустойчивого управления, описан в работе [7].

Отечественные авторы описывают задачу реконфигурации БК КА с помощью статической модели булева программирования, изначально уходя от строгого решения задачи планирования и ориентируясь на эвристические способы и методы [7]. С другой стороны,

авторы [7] основное внимание уделяют структурно-функциональным связям элементов БК КА, описываемым с помощью особых показателей эффективности функционирования КА, в которых учитывается логика взаимодействия этих элементов при выполнении задач КА. Однако недостатком такого подхода является необходимость составления сложных функций эффективности „вручную“, что может значительно затруднить его применение на практике. Также можно утверждать, что задача математического программирования, о которой говорится в работе [9], не предполагает изменения режима функционирования КА, а ограничивается только поиском конфигурации БК в текущем режиме, выполняющей функцию, аналогичную потерянной („отказавшей“).

Выбор оптимальной конфигурации восстановления работоспособности БК на основе вероятностного полинома. В качестве альтернативы рассмотренным ранее подходам к решению задачи выбора конфигурации БК КА с учетом многорежимности его функционирования предлагается использовать подход, базирующийся на вероятностном полиноме [11, 12] (далее будем называть такой подход к реконфигурации структурно-функциональным).

Ключевую роль в этой задаче будет играть вероятностный полином, который формируется с помощью общего логико-вероятностного метода [13] на основе схемы функциональной целостности, проектируемой экспертами (как правило, специалистами по бортовым системам КА) и описывающей функционирование КА, в том числе с учетом многорежимности. По сути, полином представляет базу знаний экспертов, описанную в виде многочленов большой размерности. Полином содержит знания обо всех работоспособных конфигурациях БК в заданных режимах и будет описываться следующим образом:

$$\mathcal{R}(P_1, \dots, P_j, \dots, P_n, Q_1, \dots, Q_j, \dots, Q_n, \alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_m), \quad (1)$$

где P_j, Q_j — вероятность наступления альтернативных событий, характеризующая работоспособность и отказ j -го элемента, а α_i — степень использования i -го режима.

В работе [14] предложена методика структурно-функциональной реконфигурации, которая сводится к планированию смены режимов КА. Реконфигурация выполняется по принципу автоматического управления, получающего на вход рассогласование (отказ или сбой в БК), а на выходе формирующее управляющее воздействие (рабочую конфигурацию БК, соответствующую ее текущему режиму). Функционирование БК КА (смена его режимов) планируется исходя из логики ранжирования соответствующих режимов по правилу: приоритетный режим — текущий, далее группа альтернативных режимов, которая обеспечивает применение КА по целевому назначению, затем — любой режим, который является обеспечивающим при штатном функционировании КА, после этого — „аварийный“ режим (используется минимально возможный состав БК, а КА находится в ориентированном положении для выполнения сеансов связи с наземным комплексом управления (НКУ) или для поддержания минимально необходимого энергобаланса).

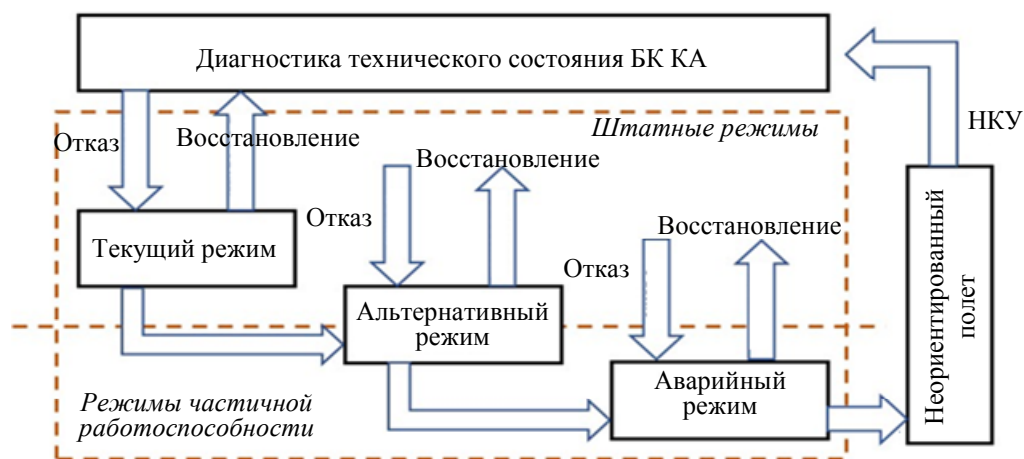


Рис. 2

Предложенная в [14] методика структурно-функциональной реконфигурации, которая связана с планированием смены режимов КА (рис. 2), состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Анализ возможности выбора конфигурации БК в текущем режиме. Если имеется возможность, то переход на шаг 5, иначе — переход на шаг 2.

Шаг 2. Анализ возможности выбора конфигурации БК в альтернативном или обеспечивающем режиме. Если возможно, переход на шаг 6, иначе — на шаг 3.

Шаг 3. Анализ возможности выбора конфигурации БК в „аварийном“ режиме без наземного комплекса управления (попадание в ситуацию, когда КА не способен выполнять задачи по предназначению). Если возможно, переход на шаг 7, иначе — шаг 4.

Шаг 4. Переход в режим неориентированного полета. Вызов наземного комплекса управления. Выход из алгоритма.

Шаг 5. Решение задачи выбора конфигурации БК КА в текущем режиме, включение БК в контур управления или его исключение. Выход из алгоритма.

Шаг 6. Выбор конфигурации БК КА в альтернативном режиме, включение элемента БК в контур управления или ее исключение. Выход из алгоритма.

Шаг 7. Выбор конфигурации БК КА в „аварийном“ режиме, включение элемента БК в контур управления или его исключение. Выход из алгоритма.

Проверка возможности выбора конфигурации БК в заданном режиме (шаги 1, 2, 3 методики структурно-функциональной реконфигурации) осуществляется на основе расчета показателя живучести для этого режима с использованием вероятностного полинома. Указанная проверка состоит в анализе выполнимости следующего условия:

$$\mathfrak{R}(\mathbf{s}^+) > 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{s}^+ = \{\mathbf{u}, \boldsymbol{\alpha}_r\}^1$ — вектор состояния КА, при котором в рабочую конфигурацию БК $\mathbf{u}$ включены все работоспособные элементы и вектор $\boldsymbol{\alpha}_r = \{0, \dots, 1_r, \dots, 0\}$ соответствует заданному режиму (или группе режимов $\boldsymbol{\alpha}_r = \{0, \dots, 1_{r1}, \dots, 1_{rN}, \dots, 0\}$, $1, \dots, N$ — группа альтернативных или обеспечивающих режимов). Если это условие удовлетворяется, можно переходить к решению задачи выбора конфигурации БК КА в требуемом режиме.

В общем случае эта задача может быть представлена виде:

$$G_i(\mathbf{u}) \rightarrow \text{extr}, \quad (3)$$

$$R_j(\mathbf{s}') > 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{s}' = \{\mathbf{u}, \boldsymbol{\alpha}_r\} \in \Theta', \quad (5)$$

$$\Theta' = \{\mathbf{s} | \mathfrak{R}(\mathbf{s}') > 0\}, \quad (6)$$

где $G_i(\mathbf{u})$ — критериальные функции, характеризующие эффективность выбранной конфигурации БК $\mathbf{u}$; $R_j(\mathbf{s}')$ — функции, описывающие ограничения на выбор конфигурации $\mathbf{u}$ с учетом требуемого режима $\boldsymbol{\alpha}_r$; $i, j \in O$ — множество функций, характеризующих принципы функционирования КА; $\mathbf{s}'$ — вектор состояния КА, описываемый конфигурацией БК $\mathbf{u}$ и вектором режимов функционирования КА $\boldsymbol{\alpha}_r$; Θ' — множество работоспособных конфигураций для установленного в векторе $\boldsymbol{\alpha}_r$ режима; $\mathfrak{R}$ — полином, соответствующий выбранному варианту функционирования КА.

Для упрощения дальнейших записей рассмотрим описание и решение задачи выбора конфигурации БК КА (см. шаги 5, 6, 7 методики структурно-функциональной реконфигурации) для случая, когда используются один показатель качества управления и два ограничения:

$$G_1(\mathbf{u}) \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$R_1(\mathbf{s}') > 0, \quad (8)$$

$$R_2(\mathbf{s}') > 0, \quad (9)$$

где $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$ — вектор, характеризующий рабочую конфигурацию БК КА, если $u_i = 0$ — в рабочей конфигурации не задействуется i -й элемент, если $u_i = 1$ — в противоположном случае; $R_1(\mathbf{s}') = R_1^i(\mathbf{u}) = \mathfrak{R}(\mathbf{s}') = \mathfrak{R}(P_1 \cdot u_1, \dots, P_n \cdot u_n, Q_1 \cdot \bar{u}_1, \dots, Q_n \cdot \bar{u}_n, 0_1, \dots, \alpha_i, \dots, 0_m)$ — оценка живучести КА для i -го (требуемого) режима с учетом рабочей конфигурации $\mathbf{u}$, m — число режимов КА; $R_2(\mathbf{s}') = E_i^+ - E(\mathbf{u})$, $E(\mathbf{u})$ — расход электроэнергии рабочей конфигурацией БК $\mathbf{u}$, E_i^+ — накапливаемая электроэнергия в i -м режиме за определенный промежуток времени (например, виток, сутки и т.п.); $G_1(\bar{u}) = \sum_{i=1}^n u_i \cdot c_i / \sum_{i=1}^n u_i$ — целевая функция, характеризующая расход временного ресурса БК, который необходимо перераспределить при решении задачи выбора, где $c_i = \frac{T_i^P - \tau_i}{T_i^P}$ — коэффициент использования i -й БК в течение эксплуата-

ции КА, T_i^P — временной ресурс элемента, τ_i — наработка элемента. Отметим, что значение критериальной функции (показателя ресурсоемкости) $G_1(\mathbf{u})$ становится тем выше, чем большее количество БК с неизрасходованным временным ресурсом включается в рабочую конфигурацию.

Для решения задачи с учетом описанных ограничений и показателя ресурсоемкости БК КА предлагается использовать методы [15], базирующиеся на бионическом подходе и теории случайного поиска, а именно алгоритм случайного направленного поиска и „жадный“ алгоритм. Сущность применения этих алгоритмов состоит в организации повторяющейся генерации и поиске допустимых альтернатив (конфигураций) в ходе многочисленных машинных экспериментов. По результатам каждого эксперимента формируется рабочая (допустимая) конфигурация БК из числа сгенерированных альтернатив. По окончании работы алгоритма выбирается оптимальная конфигурация.

Кратко остановимся на особенностях реализации предлагаемых алгоритмов. Так, показатель живучести КА для выбираемой конфигурации БК в i -м режиме оценивается по следующей формуле:

$$R_{1i}(\mathbf{u}_k) = \mathfrak{R}(P_1 u_1, \dots, P_j u_j, \dots, P_n u_n, Q_1 \bar{u}_1, \dots, Q_j \bar{u}_j, \dots, Q_n \bar{u}_n, 0_{n+1}, \dots, \alpha_{n+i}, \dots, 0_{n+m}) \Big|_{P_j=Q_j=0,5, j=1, \dots, n, \alpha_{n+i}=0,5} \quad (10)$$

Если $R_{1i}(\mathbf{u}_k) = 0$, то конфигурация считается неработоспособной. Тогда требуется выбрать и ввести в конфигурацию работоспособный элемент. Новая конфигурация будет характеризоваться вектором $\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k \oplus \mathbf{e}_j$, где $\mathbf{e}_j = (0_1, \dots, 1_j, \dots, 0_n)$ — вектор, соответствующий включению некоторого исправного j -го элемента в рабочую конфигурацию, $\oplus$ — оператор булева сложения. Если после ввода j -го элемента состояние БК КА остается неработоспособным ($R_{1i}(\mathbf{u}_{k+1}) = 0$), то процесс формирования рабочей конфигурации БК следует продолжить. В противоположном случае ($R_{1i}(\mathbf{u}_{k+1}) > 0$) процесс завершается.

Примем за начальную такую конфигурацию, когда ни один элемент БК не включен (т.е. $\mathbf{u}_0 = (0_1, 0_2, \dots, 0_n)$, $R_{1i}(\mathbf{u}_0) = 0$). Тогда сценарий включения элементов в рабочую конфигу-

рацию БК можно представить последовательностью $\mathbf{u}_0 \xrightarrow{e_{j1}=1} \dots \mathbf{u}_{k-1} \xrightarrow{e_{jk}=1} \mathbf{u}_k \dots \rightarrow$. При формировании указанной последовательности главная задача состоит в выборе очередного элемента из числа работоспособных.

Для текущей конфигурации каждый работоспособный и не включенный в конфигурацию $\mathbf{u}_k$ j -й элемент характеризуется структурной значимостью, вычисляемой по следующей формуле [16]:

$$\xi_j(\mathbf{u}_k) = \mathfrak{R}_j^+ - \mathfrak{R}_j^-, \quad (11)$$

где $\mathfrak{R}_j^+ = \mathfrak{R}_j(P_1 u_1, \dots, P_j u_j, \dots, P_n u_n, Q_1 \bar{u}_1, \dots, Q_j \bar{u}_j, \dots, Q_n \bar{u}_n, 0_{n+1}, \dots, \alpha_{n+i}, \dots, 0_{n+m})$, где $P_i = 0,5$, $Q_i = 0,5$, $i = 1, \dots, j-1, j+1, \dots, n$, $P_j = 1$, $Q_j = 0$, $\alpha_{n+i} = 0,5$,

$$\mathfrak{R}_j^- = \mathfrak{R}_j(P_1 u_1, \dots, P_j u_j, \dots, P_n u_n, Q_1 \bar{u}_1, \dots, Q_j \bar{u}_j, \dots, Q_n \bar{u}_n, 0_{n+1}, \dots, \alpha_{n+i}, \dots, 0_{n+m}),$$

где $P_i = 0,5$, $Q_i = 0,5$, $i = 1, \dots, j-1, j+1, \dots, n$, $P_j = 0$, $Q_j = 1$, $\alpha_{n+i} = 0,5$. Другими словами, ξ_j отражает суммарный вклад данного элемента в живучесть КА.

В зависимости от правила выбора элемента конфигурации предлагается решать задачу математического программирования либо „жадным“ алгоритмом, на каждом шаге выбирая элемент с максимальной структурной значимостью, либо алгоритмом случайного направленного поиска, где выбор осуществляется случайно, но более вероятно для элемента (прибора) с большей значимостью (алгоритм softmax) [4]. Для равнозначных элементов предлагается использовать комбинированный алгоритм.

„Жадный“ алгоритм. На каждой k -й итерации выбор включаемого элемента осуществляется по следующему правилу:

$$\xi_{j_k} = \max \left\{ \xi_j(\mathbf{u}_k) \mid u_{kf} = 0, f \in \Phi \right\}, \quad (12)$$

где Φ — множество неработоспособных элементов, то есть выбирается элемент с максимальной значимостью из числа работоспособных.

Алгоритм случайного направленного поиска. При построении рабочей конфигурации каждый элемент выбирается следующим образом. Для вектора $\mathbf{u}_k$ формируется вектор величин значимости работоспособного БК $\{\xi_1, \dots, \xi_j, \dots, \xi_l\} = \{\xi_j(\mathbf{u}_k) \mid u_{jf} = 0, f \in \Phi\}$, причем $\xi_j \in [0, 1]$. Для поиска интервал $[0, 1]$ разбивается на подынтервалы так, что координаты концов подынтервалов образуют последовательность

$$0, \omega_1 = b_1, \omega_2 = \omega_1 + b_2, \dots, \omega_l = \omega_{l-1} + b_l, \text{ где } b_j = \frac{\xi_j}{\Lambda}, \Lambda = \sum_{j=1}^l \xi_j.$$

Здесь, чем меньше значимость элемента ξ_j в структурном построении, тем меньшая длина подынтервала $[\omega_{j-1}, \omega_j]$ отводится элементу работоспособного БК.

Для выбора включаемого элемента генерируется случайное число ζ , распределенное по равномерному закону на интервале $[0, 1]$, которое попадает в некоторый подынтервал $[\omega_{j'-1}, \omega_{j'}]$ и тем самым определяет выбор „восстанавливаемого“ элемента. Таким образом, в соответствии с построенной вероятностной гипотезой организуется поиск глобального экстремума, причем в окрестности глобального экстремума плотность случайно выбираемых

сценариев „восстановления“ $\mathbf{u}_0 \xrightarrow{e_{j1}=1} \dots \mathbf{u}_{k-1} \xrightarrow{e_{jk}=1} \mathbf{u}_k \dots \rightarrow$ будет наибольшей.

Комбинированный алгоритм. Чтобы сформировать множество альтернатив, по аналогии с алгоритмом случайного направленного поиска для „жадного“ алгоритма, необходимо провести серию испытаний, где при каждом последующем испытании возможно построение новой рабочей конфигурации БК. Так как в контур управления КА входят элементы, имеющие одинаковую значимость (т.е. эквивалентные с точки зрения структурного построения), то при последовательном включении элементов в рабочую конфигурацию $\mathbf{u}$ возникает неоднозначность в выборе элемента с максимальной значимостью (структура может иметь несколько таких элементов). В результате выбор элемента целесообразно осуществлять случайным образом. Тем самым, предлагается комбинировать „жадный“ и случайный выбор.

Реализация алгоритмов поиска работоспособных конфигураций БК осуществляется N раз. По завершении N экспериментов формируется множество альтернатив Θ' , из которых выбираются варианты, удовлетворяющие ограничению на энергопотребление $R_2(\mathbf{s}') > 0$. Из оставшихся конфигураций выбираются оптимальные, удовлетворяющие следующему критерию $G_1(\mathbf{u}) \rightarrow \max$. В случае неоднозначности получаемых результатов можно также применить случайный выбор.

Заключение. В статье кратко рассмотрены варианты решения задачи выбора работоспособной конфигурации БК КА в контексте более общей задачи реконфигурации КА или даже планирования его работы [5, 7—9].

Основные недостатки существующих вариантов конфигурации (и реконфигурации БК КА), предложенных зарубежными и отечественными авторами, состоят либо в отсутствии учета структурно-функциональных взаимосвязей элементов БК (представленных, например, в подходах, основанных на моделях MDP), либо в их слабой формализации (см. отечественных авторов [8, 9]), описывающей задачу выбора конфигурации БК (байпаса) в весьма ограниченной постановке (рассматривались только две целевые функции: энергопотребление и эффективность БК КА). Также к недостаткам подхода, предлагаемого отечественными авторами, можно отнести отсутствие учета многорежимности функционирования КА и, как следствие, недостаточное внимание вопросу смены режимов при проведении реконфигурации.

Безусловный интерес представляет дальнейший синтез подходов на основе моделей MDP с учетом многорежимности функционирования не только КА, но и элементов БК, а также структурно-функциональных взаимосвязей, возникающих при функционировании БК КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meß J.-G., Dannemann F., and Greif F. Techniques of Artificial Intelligence for Space Applications — A Survey // Conference: European Workshop on On-Board Data Processing (OBDP2019). 2019. P. 1—14.
2. Yin Shen et al. A Review on Recent Development of Spacecraft Attitude Fault Tolerant Control System // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63, N 5. P. 3311—3320.
3. Nasir A., Atkins E., Kolmanovsky I. Review of Tools and Methods for Fault Tolerance in Spacecraft Mission Planning // J. of Space Technology. 2018. Vol. 18, is. 1.
4. Самтон Р. С., Барто Э. Дж. Обучение с подкреплением: Введение / Пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.
5. Nasir A., Atkins E., and Kolmanovsky I. A mission based fault reconfiguration framework for spacecraft applications // J. of Aerospace Computing, Information and Communication. 2012. Vol. 11, N 10. P. 1—12.
6. Chen J. W., Cheng Y. H., and Jiang B. Mission-constrained spacecraft attitude control system on-orbit reconfiguration algorithm // Journal of Astronautics. 2017. Vol. 38, N 9. P. 989—997.
7. Cheng Y., Jiang B., Li H., and Han X. On-orbit reconfiguration using adaptive dynamic programming for multimission-constrained spacecraft attitude control system // Intern. J. of Control, Automation and Systems. 2019. Vol. 17, N 4. P. 822—835.

8. Егоров А. М., Белоконов И. В. Выбор состава бортовых средств для обеспечения заданной живучести наноспутника // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2018. Т. 5, № 3. С. 78—86. DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.78.86. EDN YQWXIT.
9. Белоконов И. В., Егоров А. М. Проблема живучести наноспутника и ее обеспечение за счет использования функциональной избыточности // *Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки*. 2019. № 8. С. 287—298. EDN CTNUST.
10. Калинин В. Н., Кулаков А. Ю., Павлов А. Н. и др. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконфигурацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 20, № 2. С. 236—269. DOI 10.15622/ia.2021.20.2.1. EDN BMHJYS.
11. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Vorotyagin V. N., Umarov A. B. Structural and functional analysis of supply chain reliability in the presence of demand fluctuations // *Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020)*. 2020. N 1.
12. Кулаков А. Ю., Павлов А. Н., Павлов Д. А. Функциональная реконфигурация чувствительных элементов системы управления движением космического аппарата // *Тр. СПИИРАН*. 2013. № 5(28). С. 169—181. EDN QYZRZR.
13. Ryabinin I. A., Strukov A. V. Quantitative examples of safety assessment using logical-probabilistic methods // *Intern. J. of Risk Assessment & Management*. 2018. Vol. 21, N 1-2. P. 4—20. DOI 10.1504/IJRAM.2018.090253. EDN XXERLF.
14. Научно-технический отчет (промежуточный, 1 этап) по теме „Проектно-поисковые исследования в части управления целевым применением многоспутниковой ОГ КА ДЗЗ с помощью бортового интеллектуального вычислительного комплекса“ (шифр „Нейроборт БИВК-ИИ-СПИИРАН“). СПб: ФИЦ РАН, 2021. Кн. 2. 184 с.
15. Растринин Л. А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинанте, 1981. 375 с.
16. Павлов А. Н., Павлов Д. А., Кулаков А. Ю., Умаров А. Б. Анализ значимости элементов цепи поставок при изменяющихся спросах клиентов // *Тр. 6-й Междунар. науч.-практ. конф. „Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем“ (ИКМ МТМТС-2021)*. СПб, 23 июня 2021 года. СПб: Изд-во „Перо“, 2021. С. 104—112. EDN VHEJNV.

Сведения об авторе

Александр Юрьевич Кулаков

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; старший научный сотрудник; E-mail: russ69@bk.ru

Поступила в редакцию 30.08.22; одобрена после рецензирования 09.09.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Meß J.-G., Dannemann F., and Greif F. *Conference: European Workshop on On-Board Data Processing (OBDDP2019)*, 2019, pp. 1–14.
2. Yin Shen et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, no. 5(63), pp. 3311–3320.
3. Nasir A., Atkins E., Kolmanovsky I. *Journal of Space Technology*, 2018, no. 1(18).
4. Sutton R.S. and Barto A.G. *Reinforcement Learning: An Introduction*, The MIT Press Cambridge, MA, 2018.
5. Nasir A., Atkins E., and Kolmanovsky I. *Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*, 2012, no. 10(11), pp. 1–12.
6. Chen J.W., Cheng Y.H., and Jiang B. *Journal of Astronautics*, 2017, no. 9(38), pp. 989–997.
7. Cheng Y., Jiang B., Li H., and Han X. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, no. 4(17), pp. 822–835.
8. Egorov A.M., Belokonov I.V. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2018, no. 3(5), pp. 78–86, DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.78.86, EDN YQWXIT.
9. Belokonov I.V., Egorov A.M. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*, 2019, no. 8, pp. 287–298, EDN CTNUST.
10. Kalinin V., Kulakov A., Pavlov A., Potryasaev S., Sokolov B. *Informatics and Automation*, 2021, no. 2(20), pp. 236–269, DOI 10.15622/ia.2021.20.2.1, EDN BMHJYS.
11. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020 (MMRIST 2020)*, 2020, no. 1.
12. Kulakov A.Yu., Pavlov A.N., Pavlov D.A. *Trudy SPIIRAN (SPIIRAS Proceedings)*, 2013, no. 5(28), pp. 169–181, EDN QYZRZR.
13. Ryabinin I.A., Strukov A.V. *International Journal of Risk Assessment & Management*, 2018, no. 1-2(21), pp. 4–20, DOI 10.1504/IJRAM.2018.090253, EDN XXERLF.

14. *Nauchno-tekhnicheskiy otchet (promezhutochnyy, 1 etap) po teme „Proyektно-poiskovyye issledovaniya v chasti upravleniya tselevym primeneniym mnogospurnikovoy OG KA DZZ s pomoshch'yu bortovogo intellektual'nogo vychislitel'nogo kompleksa“ (shifr „Neurobot BIVK-II-SPIIRAN“)* (Scientific and Technical Report (Intermediate, Stage 1) on the Topic “Design and Exploratory Research in Terms of Controlling the Targeted Use of the Multi-Satellite Remote Sensing Satellite with the Help of an Onboard Intelligent Computer Complex” (code “Neurobot BIVK-II-SPIIRAN”), St. Petersburg, 2021, Book 2, 184 p. (in Russ.)
15. Rastrigin L.A. *Adaptatsiya slozhnykh sistem* (Adaptation of Complex Systems), Riga, 1981, 375 p. (in Russ.)
16. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Kulakov A.Yu., Umarov A.B. *Imitatsionnoye i kompleksnoye modelirovaniye morskoy tekhniki i morskikh transportnykh sistem (IKM MTMTS-2021)* (Simulation and Complex Modeling of Marine Equipment and Marine Transport Systems" (IKM MTMTS-2021)), Proceedings of the Sixth International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, June 23, 2021, pp. 104–112, EDN VHEJNV. (in Russ.)

Data on author**Alexander Yu. Kulakov**

— PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Senior Researcher; E-mail: russ69@bk.ru

Received 30.08.22; approved after reviewing 09.09.22; accepted for publication 27.12.22.

**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ МАШИНЫ
ПРИ ПОСТРОЕНИИ КОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ**

С. В. КУЛЕШОВ, И. О. ШАЛЬНЕВ*

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
Санкт-Петербург, Россия
shalnev.i@iias.spb.su

Аннотация. Решается задача построения архитектуры распределенной виртуальной машины. Предложена техническая реализация распределенной виртуальной машины, обеспечивающей построение инфокоммуникационной инфраструктуры на новых принципах. Передача данных между узлами сети при этом происходит как программное взаимодействие между отдельными узлами виртуальной машины, что позволяет разработчику приложений в рамках распределенной системы абстрагироваться от коммуникационного уровня. Предложены минимально достаточный набор инструкций виртуальной машины для обеспечения удаленного вызова функций, а также механизм расширения набора инструкций прикладными функциями. Отличительной особенностью архитектуры является использование объектно-ориентированного подхода для построения расширяемой среды выполнения байт-кода с возможностью обращения к объектам, расположенным удаленно на узлах сети. Подход применим в ряде практических задач, в частности, для построения распределенных интерактивных приложений, информационных систем, а также для организации коммуникации между робототехническими комплексами в роевых сценариях их применения.

Ключевые слова: виртуальная машина, транспортный пакет, инфокоммуникация, байт-код, интерпретатор

Благодарности: работа поддержана Государственным заданием № FFZF-2022-0005.

Ссылка для цитирования: Кулешов С. В., Шальнев И. О. Особенности реализации распределенной виртуальной машины при построении коммуникационной инфраструктуры общего назначения // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 112—117. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-112-117.

**FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF A DISTRIBUTED VIRTUAL MACHINE WHEN BUILDING
A GENERAL-PURPOSE COMMUNICATION INFRASTRUCTURE**

S. V. Kuleshov, I. O. Shalnev*

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
shalnev.i@iias.spb.su*

Abstract. The problem of building the architecture of distributed virtual machine is being solved. A technical implementation of a distributed virtual machine is proposed, which provides the construction of an infocommunication infrastructure based on new principles. In the case under consideration, data transfer between network nodes occurs as a software interaction between individual nodes of a virtual machine, which allows the application developer within a distributed system to abstract from the communication level. A minimally sufficient set of instructions for a virtual machine is proposed to provide remote function calls, as well as a mechanism for extending the set of instructions with application functions. A distinctive feature of the architecture is the use of an object-oriented approach to build an extensible bytecode execution environment with the ability to access objects located remotely on network nodes. The approach is applicable in a number of practical tasks, in particular, for building distributed interactive applications, information systems, as well as for organizing communication between robotic systems in swarm scenarios of their use.

Keywords: virtual machine, transport packet, infocommunication, bytecode, interpreter

Acknowledgment: the work was supported by State Assignment No. FFZF-2022-0005.

For citation: Kuleshov S. V., Shalnev I. O. Features of the implementation of a distributed virtual machine when building a general-purpose communication infrastructure. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 112—117 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-112-117.

Одним из эффективных способов реализации коммуникационной инфраструктуры общего назначения для передачи цифровых данных в сети терминальных устройств является использование распределенной виртуальной машины (РВМ) [1]. Как было отмечено в [1], коммуникационная среда для межкомпонентного взаимодействия реализуется при этом средствами самой виртуальной машины.

Такой подход имеет следующие преимущества:

- используя средства распределенной виртуальной машины, разработчик приложений получает все преимущества коммуникационной инфраструктуры, при этом не затрачивая ресурсы на ее разработку;
- изменение функционального содержания программных компонентов узлов сети возможно без обновления их программного кода.

Традиционно технология виртуализации применялась для разделения ресурсов между задачами или пользователями, а также для реализации аппаратных ресурсов программно [2]. Виртуальные машины как основной механизм технологии виртуализации обеспечивают программную реализацию вычислительного устройства с заданными свойствами [3]. Специфика применения таких машин накладывает требования и ограничения на техническую реализацию для обеспечения потребностей инфокоммуникации. Рассмотрим эти особенности подробнее.

Распределенная виртуальная машина — программная реализация совокупности взаимодействующих языковых виртуальных машин, поддерживающих парадигму объектно-ориентированного подхода [4]. Эти машины работают в едином адресном пространстве и в общем пространстве имен объектов и функций, они обеспечивают доступ к функциям удаленных объектов. Возможная структура РВМ приведена на рис. 1.

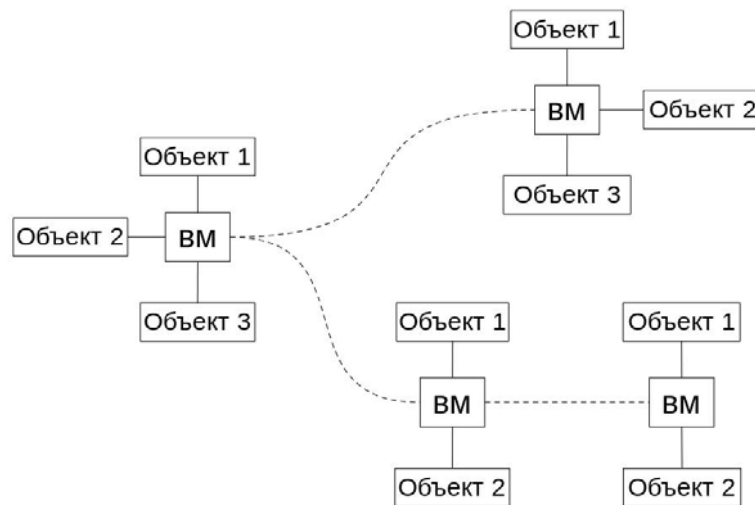


Рис. 1

Изменяя расположение объектов по узлам РВМ, можно обеспечить:

- расположение объекта (т.е. исполнимого программного кода, соответствующего данному объекту) непосредственно на узле, на котором он функционирует (в первую очередь речь идет о периферийных устройствах, содержащихся в узлах, таких как датчики и исполнительные механизмы);
- повышение эффективности работы узлов за счет балансировки объема исполняемого кода между узлами РВМ, с учетом оценки доступных вычислительных ресурсов каждого узла.

Основным недостатком при этом является некоторое возрастание нагрузки на физические каналы передачи данных вследствие увеличения объема передаваемых данных. Это происходит в связи с тем, что вместе с данными, относящимися к бизнес-логике приложения, требуется передавать фрагменты исполнимого кода, имплементирующие объекты на удаленных узлах РВМ.

Распределенное взаимодействие [5] между узлами сети обеспечивается при помощи механизма удаленного вызова методов (Remote Method Invocation, RMI) [6, 7]. Функционирование узлов PBM предполагает выполнение программного кода вычислителями (процессорами) этих узлов — интерпретации инструкций байт-кода. Интерпретатор реализован в функции, где началу каждой инструкции сопоставляется адрес в памяти (метка), к которой можно обратиться при помощи оператора безусловного перехода (оператор goto). Внутреннее исполнение байт-кода таким интерпретатором представлено в виде последовательности меток адресов памяти на начало инструкций. Примером подобного способа представления байт-кода является Direct Threading Table (DTT), используемый в виртуальной машине JVM [8] языка программирования Java (рис. 2).

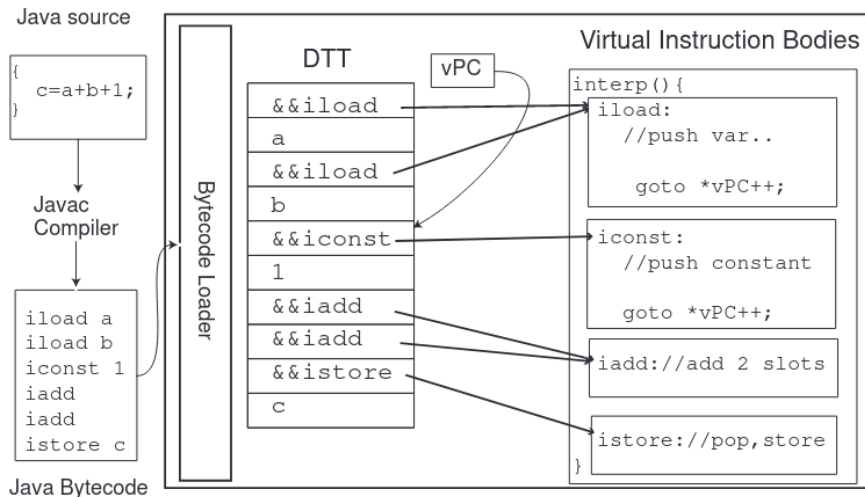


Рис. 2

Интерпретация байт-кода начинается с установки указателя vPC на адрес первой метки в DTT, после которого происходит „переход“ на адрес, хранящийся в таблице. Каждое тело инструкции заканчивается оператором goto *vPC++, который инкрементирует счетчик операций, указывающий на следующую инструкцию, находящуюся в загруженном представлении байт-кода.

Собственно коммуникационное взаимодействие внутри PBM реализуется на уровне абстракции класса Connection, который инкапсулирует все основные функциональные блоки взаимодействия вычислительных узлов, скрывая от разработчика технические подробности сетевого взаимодействия. Класс Connection содержит функциональные блоки:

- управления транспортным слоем;
- формирования и подготовки транспортных пакетов;
- сборки пакета байт-кода (Script Assembler);
- управления коллекциями классов аксессоров;
- управления таблицами API и аксессор-объектов;
- управления языковой виртуальной машиной.

Ключевым блоком PBM является языковая виртуальная машина, которая интерпретирует байт-код, включающий четыре основных инструкции [9]:

- PUSH — инструкция размещения значения в верхушку стека;
- CRT — инструкция создания распределенного объекта;
- DEL — инструкция удаления распределенного объекта;
- CALL — инструкция вызова метода распределенного объекта.

Каждая инструкция сопровождается аргументами, размещаемыми в стеке при помощи инструкции PUSH. Инструкция CRT использует четыре аргумента или более (рис. 3). Первые два — идентификаторы коллекции (библиотеки функций) и типа объекта, третий аргумент — непосредственно идентификатор, позволяющий однозначно определить удаленный объект в

среде выполнения PBM. При создании объекта виртуальная машина добавляет соответствующую запись в таблицу, а по идентификатору она может обращаться к области памяти, в которой этот объект создан и локализован. Кроме того, таблица объектов является средством синхронизации вычислительных устройств на узлах распределенной системы и находится как на стороне подлинного объекта (области кода, имплементирующего объект), так и на стороне объекта-заглушки (кода, реализующего интерфейс к подлинному объекту). Именно при помощи этой структуры данных возможно манипулировать объектами в PBM.

Четвертый аргумент инструкции CRT является идентификатором конструктора для исполняемого объекта, так как в общем случае конструкторов у объекта может быть несколько. Опциональные (не обязательные) аргументы, начиная с пятого, относятся непосредственно к методу-конструктору исполняемого объекта.

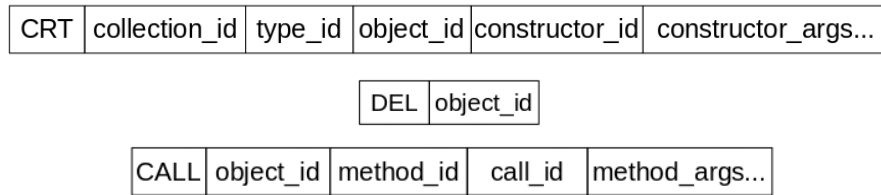


Рис. 3

Инструкция удаления объекта DEL имеет один аргумент — идентификатор удаляемого объекта. При исполнении инструкции DEL объект будет удален как из памяти, так и из таблицы объектов.

Инструкция CALL производит вызов удаленного метода. Первый аргумент инструкции — идентификатор объекта, к которому выполняется обращение, второй аргумент — идентификатор метода выбранного объекта. Третий аргумент служит для реализации механизма обратного вызова (callback function), чтобы обеспечить возможность асинхронного взаимодействия, и содержит идентификатор метода, который будет вызван при завершении функции. Опциональные аргументы, начиная с четвертого, относятся непосредственно к вызываемому методу и передаются ему в качестве аргументов.

Описанное множество инструкций необходимо и достаточно для организации распределенного взаимодействия в рамках PBM. Идентификаторы методов являются механизмом расширения системы инструкций виртуальной машины, при этом каждая пользовательская или прикладная инструкция, вновь вводимая программистом, необходима для вызова исполнимого кода какого-либо объекта. Таким образом, добавлением нового объекта в пул объектов PBM расширяются система инструкций данной PBM и соответственно интерпретатор виртуальной машины.

Выводы. В статье предложен вариант технической реализации распределенной виртуальной машины, обеспечивающей построение инфокоммуникационной инфраструктуры на новых принципах. Передача данных между узлами сети при этом происходит как программное взаимодействие отдельных узлов виртуальной машины, что позволяет разработчику приложений в рамках распределенной системы абстрагироваться от коммуникационного уровня.

Раскрыты основные особенности предложенной системы инструкций, а также механизма расширения набора функций языковой виртуальной машины прикладными и пользовательскими функциями.

Использование такого подхода позволяет повысить скорость разработки распределенных программных информационных и информационно-управляющих систем и увеличить эффективность их работы за счет балансировки объема исполняемого кода между узлами распределенной виртуальной машины, основанной на оценке ресурсов узлов [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шальнев И. О. Подход к построению распределенной виртуальной машины на основе объектно-ориентированного программирования // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2020. Вып. 9. С. 40—47.
2. Smith J. E., Nair R. The Architecture of Virtual Machines // Computer. 2005. Vol. 38, N 5. P. 32—38, 395—396. DOI: 10.1109/MC.2005.173.
3. Турилин И. И., Галалу В. Г., Дагаев А. В. Виртуальные машины, операционные системы и приложения. Таганрог, 2015. 64 с.
4. Лафоре Р. Объектно-ориентированное программирование в C++. СПб: Питер, 2016. 928 с.
5. Радченко Г. И. Распределенные вычислительные системы. Челябинск, 2012. 176 с.
6. Thomborson C. D., Nicolescu R. Test bed for Distributed Object Technologies using Java. The University of Auckland, Information Technology Faculty, 1999. 263 p.
7. Lindholm T., Yellin F., Bracha G., Buckley A. The Java Virtual Machine Specification. Oracle America, Inc., 2015. 604 p.
8. Zaleski M. YETI: a gradually Extensible Trace Interpreter // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Virtual Execution Environments (VEE 2007). San Diego, California, USA, 13—15 June 2007. 155 p. DOI:10.1145/1254810.1254823.
9. Шальнев И. О. Подход к построению распределенных систем на основе балансировки объема исполняемого кода между сетевыми узлами // Матер. 4-й Междунар. науч. конф. „Технологическая перспектива: новые рынки и точки экономического роста“. СПб: Центр науч.-информ. техн. „Астерион“, 2018. С. 151—158.
10. Шальнев И. О. Объектно-ориентированный подход к описанию взаимодействия группы робототехнических средств // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2021. № 1. С. 125—137. DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-125-137.

Сведения об авторах

Сергей Викторович Кулешов

— д-р техн. наук, профессор РАН; Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория автоматизации научных исследований, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; главный научный сотрудник; E-mail: kuleshov@ias.spb.su

Илья Олегович Шальнев

— Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория автоматизации научных исследований, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; младший научный сотрудник; E-mail: shalnev.i@ias.spb.su

Поступила в редакцию 29.08.22; одобрена после рецензирования 14.09.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Shalnev I.O. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*, 2020, no. 9, pp. 40—47. (in Russ.)
2. Smith J.E., Nair R. *Computer*, 2005, no. 5(38), pp. 32—38, 395—396, DOI:10.1109/MC.2005.173.
3. Turilin I.I., Galalu V.G., Dagaev A.V. *Virtual'nyye mashiny, operatsionnyye sistemy i prilozheniya* (Virtual Machines, Operating Systems and Applications), Taganrog, 2015, 64 p. (in Russ.)
4. Lafore R. *Object-Oriented Programming in C++*, Sams Publishing, 2002.
5. Radchenko G.I. *Raspredeleennyye vychislitel'nyye sistemy* (Distributed Computing Systems), Chelyabinsk, 2012, 176 p. (in Russ.)
6. Thomborson C.D., Nicolescu R. *Test bed for Distributed Object Technologies using Java*, The University of Auckland, Information Technology Faculty, 1999, 263 p.
7. Lindholm T., Yellin F., Bracha G., Buckley A. *The Java Virtual Machine Specification*, Oracle America, Inc., 1997, 604 p.
8. Zaleski M. *Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual Execution Environments, VEE 2007*, San Diego, California, USA, June 13—15, 2007, 155 p., DOI:10.1145/1254810.1254823.
9. Shalnev I.O. *Tekhnologicheskaya perspektiva: novyye rynki i tochki ekonomicheskogo rosta* (Technological Perspective: New Markets and Points of Economic Growth), Proceedings of the 4th International Scientific Conference, St. Petersburg, 2018, pp. 151—158. (in Russ.)
10. Shalnev I.O. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2021, no. 1, pp.125—137, DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-125-137. (in Russ.)

Data on authors

- Sergey V. Kuleshov** — Dr. Sci., Professor of the RAS; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Research Automation Laboratory; Chief Researcher; E-mail: kuleshov@iias.spb.su
- Ilya O. Shalnev** — St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Research Automation Laboratory; Junior Researcher; E-mail: shalnev.i@iias.spb.su

Received 29.08.22; approved after reviewing 14.09.22; accepted for publication 27.12.22.

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ
ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

В. В. ЗАХАРОВ*, А. Ю. БАРАНОВ, Б. В. СОКОЛОВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук**Санкт-Петербург, Россия***valeriov@yandex.ru*

Аннотация. Разработана единая информационно-аналитическая платформа (ЕИАП), представлен пример ее использования при синтезе цифрового пространства современного аэропорта с применением комплексов интеллектуальных транспортно-технологических средств (ИТТС). В основу разработки и применения ЕИАП положены конструктивное описание и практическая реализация системно-кибернетического подхода и методов проектирования, организации производства и проактивного управления эксплуатацией комплексов ИТТС в едином цифровом пространстве аэропорта на основе ЕИАП, киберфизических систем, интеллектуальных цифровых интерфейсов, которые отличаются от существующих аналогов наличием уникального универсального метаязыка для описания киберфизических систем и механизмов их взаимодействия на основе интеллектуальных интерфейсов, а также возможностью оперативной интеграции неограниченного числа киберфизических систем различных классов в одну „метакиберфизическую“ систему. На основе повсеместного внедрения комплексов ИТТС осуществлена цифровая трансформация служб и систем аэропорта в единую информационно-технологическую экосистему, в рамках которой в соответствующих службах и системах возможно перейти от специализированных монофункциональных интерфейсов к универсальным, от неформализованных, неструктурированных, неполных и недостоверных сведений — к структурированным, формализованным данным и информации. Кроме того, предлагаемая трансформация позволяет существенно сократить избыточные материальные и информационные связи, а также снизить влияние человеческого фактора на показатели безопасности и эффективности функционирования аэропорта.

Ключевые слова: информационно-аналитическая платформа, единое информационное пространство, интеллектуальное транспортно-техническое средство, транспортно-логистические задачи

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00301.

Ссылка для цитирования: Захаров В. В., Баранов А. Ю., Соколов Б. В. Разработка и внедрение элементов информационно-аналитической платформы для решения транспортно-логистических задач // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 118—124. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-118-124.

**DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION
OF ELEMENTS OF AN INFORMATION AND ANALYTICAL PLATFORM FOR SOLVING TRANSPORT
AND LOGISTICS PROBLEMS**

V. V. Zakharov*, A. Yu. Baranov, B. V. Sokolov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,**St. Petersburg, Russia***valeriov@yandex.ru*

Abstract. A unified information and analytical platform (UIAP) is developed, an example of its use in the synthesis of a single digital space of a modern airport using complexes of intelligent transport and technological means (ITTS) is presented. The development and application of the UIAP is based on a constructive description and practical implementation of the system-cybernetic approach and design methods, organization of production and proactive management of the operation of ITTS complexes in a single digital space of the airport based on the UIAP, cyber-physical systems, intelligent digital interfaces that differ from existing analogues by the presence of a unique universal metalanguage for describing cyber-physical systems and mechanisms of their interaction based on intelligent interfaces, as well as the possibility of operational integration of an unlimited number of cyber-physical systems of various classes into one "metakiberphysical" system. On the basis of the widespread introduction of ITTS complexes, the digital transformation of the airport services and systems into a single information technology ecosystem is performed, within which it is possible to move from spe-

cialized monofunctional interfaces to universal ones in the relevant services and systems, from unformalized, unstructured, incomplete and inaccurate information to structured, formalized data and information. In addition, the proposed transformation makes it possible to significantly reduce redundant material and information connections, as well as reduce the impact of the human factor on the safety and efficiency of the airport.

Keywords: information and analytical platform, single digital space, intelligent transport and technological mean, transport and logistics problems

Acknowledgment: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-00301.

For citation: Zakharov V. V., Baranov A. Yu., Sokolov B. V. Development and implementation of elements of an information and analytical platform for solving transport and logistics problems. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 118—124 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-118-124.

В настоящее время в промышленных, строительных и иных структурах для управления сложными техническими и технологическими объектами (или сложными объектами, СЛО) функционирует множество автоматизированных информационно-аналитических систем (ИАС), разработанных на основе различных аналитическо-имитационных моделей и соответствующего программно-математического и информационного обеспечения [1—4]. Из-за отсутствия унификации эффективность большинства используемых на практике ИАС низка, так как они разработаны различными творческими коллективами и предприятиями для выполнения конкретных локальных технических и технологических задач и не имеют единой методической, системной и математической базы. Это затрудняет интеграцию таких систем в единый информационно-аналитический комплекс (единое информационное пространство) для скоординированного управления множеством СЛО различного назначения, объединенных для решения целевой задачи. При использовании таких ИАС возникают проблемы в агрегировании (обобщении) данных о состоянии СЛО, поступающих от различных киберфизических систем, а также в применении современных аналитических и интеллектуальных моделей и методов анализа функционирования данных объектов [2, 3].

Разработанная единая информационно-аналитическая платформа (ЕИАП) для проактивного управления СЛО, о которой идет речь в настоящей статье, представляет собой инструментальное средство для создания (интеграции) на единой методологической, методической и технологической основе ИАС различного назначения, способных объединяться в рамках соответствующих информационных пространств для скоординированного управления многочисленными разнотипными группировками СЛО с целью совместного выполнения ими общих задач [3, 5, 6].

В результате выполненного за последние 20 лет комплекса междисциплинарных исследований решена крупная научно-техническая задача обеспечения технологической независимости российских разработчиков от зарубежных производителей в области проектирования, создания и эксплуатации модельно-алгоритмического, технического, информационного и программного обеспечения проактивного управления жизненным циклом (ЖЦ) СЛО [3—6]. Особая актуальность решенной задачи обусловлена жесткими санкциями, которым подвергается РФ в сфере информационно-коммуникационных технологий. Рассматриваемая технологическая независимость обеспечивается за счет создания и широкомасштабного внедрения в различных отраслях экономики РФ отечественной многофункциональной унифицированной ЕИАП проактивного управления жизненным циклом сложных объектов. Разработанная в ходе создания ЕИАП теория проактивного управления жизненным циклом сложных объектов, положенная в основу ЕИАП, вносит существенный вклад в развитие информатики за счет обогащения ее фундаментальными научными результатами, полученными в классической и современной теории управления [3].

Основное достоинство предлагаемой ЕИАП и соответствующих инструментальных средств, ее реализующих, состоит в том, что они базируются на одной из наиболее перспективных концепций автоматизации — „программирование без программирования“, — позво-

ляющей конечным пользователям-технологам самим создавать и сопровождать уникальные программные модули автоматизации контроля и управления сложными техническими процессами и объектами, практически без участия профессиональных программистов.

Разработанная в рамках ЕИАП специализированная среда, базирующаяся на предлагаемой интеллектуальной информационной технологии, обеспечивает автоматическое (автоматизированное) формирование программных модулей, которые уже далее непосредственно использовались в многочисленных проектах создания конкретных ИАС [3—5]. Кроме того, рассматриваемая интеллектуальная информационная технология и соответствующая ЕИАП приобрели *принципиально новые качества* за счет использования на всех этапах проактивного управления жизненным циклом: (1) *киберфизических систем* (КФС), обеспечивающих управление с обратной связью не только на уровне технологических (традиционный подход), но и организационных процессов за счет постоянно актуализируемой и обрабатываемой информации; (2) *интеллектуальных интерфейсов* с элементами визуального программирования, позволяющих различным категориям пользователей на профессиональном языке осуществлять адаптивное взаимодействие с платформой в ходе проактивного управления жизненным циклом СЛО. При этом интеллектуальные интерфейсы обеспечивают тиражируемость извлекаемых у экспертов знаний о состоянии СЛО для последующего внедрения их в аналогичные смежные системы на основе использования новых логико-алгебраических и логико-лингвистических моделей, созданных для описания рассматриваемых объектов и базирующихся на постулатах теории искусственного интеллекта, инженерии знаний, теории управления.

Проактивное управление жизненным циклом (ЖЦ) СЛО позволяет, в отличие от традиционно реализуемого на практике реактивного управления, заранее предотвращать предпосылки возникновения (а не их последствия) нештатных (критических) ситуаций за счет целенаправленно сформированной структурно-функциональной избыточности. На рис. 1 представлена обобщенная архитектура созданной единой ИАП проактивного управления ЖЦ СЛО*



Рис. 1

Уникальность данной ИАП состоит в том, что она полностью удовлетворяет требованиям *импортозамещения*, поскольку является открытой (конверсионной) версией программного обеспечения, создаваемого с середины 1970-х гг. и по настоящее время в интересах решения задач Министерства обороны *независимо* от зарубежных информационных технологий и систем.

* <http://litsam.ru>; <https://petrocometa.ru>.

Среди представленных на рис. 1 основных подсистем ЕИАП новыми, принципиально отличающимися ее от отечественных и зарубежных ИАС данного класса, являются: *подсистема обработки и анализа данных, информации и знаний* (за счет реализации функций параметрической и структурной адаптации моделей к прошлым, текущим и будущим событиям, а также автоматического синтеза программ); *подсистема упреждающего многовариантного прогнозирования* (за счет реализации функции формирования моделей предиктивной аналитики, функции упреждающего ситуационного многовариантного прогнозирования); *подсистема генерации и синтеза управленческих решений* (за счет реализации функций логического и прецедентного вывода рекомендаций на основе онтологий предметной области, выбора оптимальных альтернативных решений, обоснования и объяснения этих решений, синтеза технологий и программ проактивного мониторинга и управления ЖЦ СлО) [3].

На рис. 1 также представлена география проектов, реализованных к настоящему времени в рамках созданной ЕИАП. Видно, что многофункциональность и унифицированность программно-технических решений, положенных в ее основу, позволили на практике реализовать большое число конкретных информационно-аналитических систем, успешно используемых в космонавтике, атомной энергетике, промышленном производстве. Эта работа выполнялась в тесной кооперации СПИИРАН, СКБ „Орион“, НИО ЦИТ „Петрокомета“, АО „Аэромар“, ЗАО „Универсал Аэро“ с организациями, входящими в корпорации Роскосмос, Росатом, Минпром, МО РФ.

На базе платформы ЕИАП разработано и организовано серийное производство уникальных мобильных сервисных систем — интеллектуальных транспортно-технологических средств (ИТТС) обслуживания судов гражданской авиации в едином цифровом пространстве современных и перспективных аэропортов (рис. 2) [4—7].

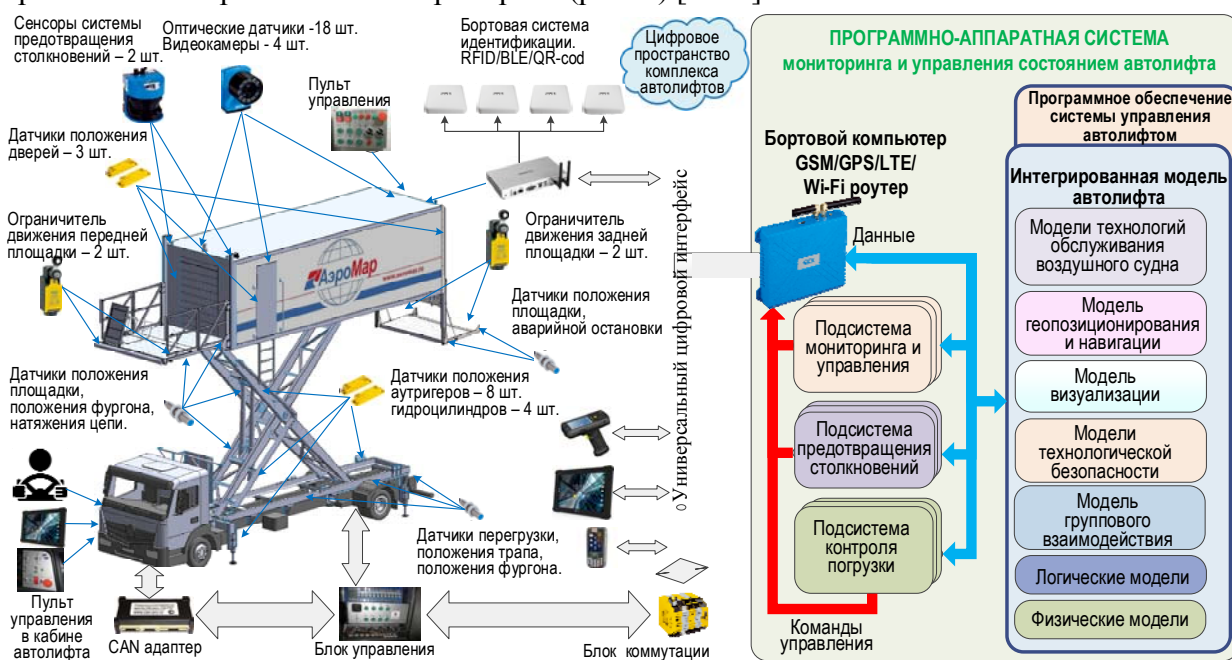


Рис. 2

Новизна ИТТС заключается в интеллектуальной системе проактивного (упреждающего) управления, которая базируется на киберфизических устройствах, а также интеллектуальных цифровых интерфейсах и позволяет согласованно и эффективно решать задачи группового взаимодействия ИТТС, управления техническим состоянием, процессами сервисного обслуживания, видеофиксации, геопозиционирования и предотвращения столкновений. На основе созданной ЕИАП разработаны методы цифровой трансформации процессов обслуживания судов гражданской авиации и методики создания единого цифрового пространства аэропорта,

в котором согласованно взаимодействуют в режиме реального времени все транспортно-технологические средства и службы аэропорта.

На рис. 3 проиллюстрированы различные варианты подключения участников технологического процесса обслуживания воздушного судна к единому цифровому пространству комплекса ИТТС [8, 9].



Рис. 3

Разработанное специальное программно-математическое обеспечение, на базе которого реализована интеллектуальная система управления комплексом ИТТС в едином цифровом пространстве, позволяет решать в автоматизированном (автоматическом) режиме транспортно-логистические задачи, к числу которых можно отнести: задачи определения числа ИТТС, необходимого для обслуживания каждого воздушного судна (ВС) на этапах подготовки к вылету (при прилете ВС); задачи синтеза технологий обслуживания и синтеза маршрутов доставки грузов и оборудования из логистического центра (склада) аэропорта до ВС; задачи определения числа операторов, необходимого для реализации синтезированных технологий; задачи определения временных интервалов обслуживания ВС; задачи группового управления ИТТС.

Главная особенность созданной системы проактивного управления сервисным обслуживанием ВС — в ней используются разработанное в ЕИАП динамическое многовариантное прогнозирование, комплексное планирование и оперативное управление ИТТС на основании информации, получаемой в режиме реального времени от всех ИТТС и от служб аэропорта. Групповое взаимодействие на базе динамического планирования (проактивного управления) позволяет существенно повысить эффективность использования ИТТС в постоянно меняющихся условиях функционирования аэропорта, и особенно — в нештатных ситуациях. Также эффективное планирование и управление позволяют существенно уменьшить парк используемых ИТТС.

В результате реализации на практике разработанных интеллектуальной информационной технологии и ЕИАП обеспечены [3—11]:

— повышение уровня обоснованности информационно-аналитической поддержки ЖЦ СЛО за счет использования данных, информации и знаний при принятии решений. Увеличение до 30 % эффективности, в частности, благодаря оперативности (до 40 %, по сравнению с существующими подходами) и достоверности (до 15 %) результатов поддержки принятия управленческих решений;

— повышение уровня автоматизации проектирования уже на этапе постановки задачи и конструктивная декомпозиция этапов разработки программного обеспечения, используемого на различных этапах ЖЦ СЛО с последовательным уточнением моделей без перехода на алгоритмический уровень;

— повышение степени соответствия разрабатываемого программного обеспечения исходным требованиям и постановке задачи, а также достоверности результатов его функционирования на основе формальных спецификаций;

— потенциальное снижение стоимости, сроков разработки и сложности масштабирования и модифицирования программного обеспечения информационно-аналитической поддержки ЖЦ СлО;

— технологичность и конструктивность процессов извлечения и представления экспертных знаний на основе графических нотаций, совместного представления бизнес-процессов, декомпозиции процесса проектирования, использования полимодельного и многоязычного принципов, комплекса средств верификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульга К. С. Интегрированная информационно-вычислительная система управления производством в режиме реального времени // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 4. С. 42—46.
2. Черняк Л. От адаптивной инфраструктуры к адаптивному предприятию // Открытые системы. 2003. № 10. С. 32—39.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
4. Ронжин А. Л., Соколов Б. В., Джао В. Ю.-Д., Миронова Е. Г., Стыскин М. М. Применение технологии радиочастотной идентификации для построения системы контроля оборота бортового кухонного оборудования // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2020. Вып. 1. С. 3—10.
5. Миротин Л. Б., Некрасов А. Г., Степанов П. В., Трегубов П. Г. Повышение эффективности грузовых перевозок на основе создания устойчивой транспортно-логистической системы модульного типа для высокоскоростной обработки и доставки грузов // Вестн. МАДИ. 2013. № 3. С. 34—36.
6. Трегубов П. Г. О концепции создания транспортной системы высокоскоростной доставки грузов пассажирскими авиарейсами на базе московского авиаузла // Автоматизация и управление в технических системах. 2014. № 2. С. 17—20.
7. Степанов П. В. Интеллектуальное транспортно-технологическое средство нового поколения и лежащая в её основе концепция „цифрового автолифта“ // Информатизация и связь. 2022. № 1. С. 22—29.
8. Stepanov P. V., Sokolov B. V. Problems of Using Bluetooth Tags with Low Power Consumption for Identifying and Determining the Position of Objects // IV Intern. Conf. on Control in Technical Systems (CTS). Saint Petersburg, 2021. P. 195—198. DOI: 10.1109/CTS53513.2021.9562858.
9. Степанов П. В. Методика использования Bluetooth технологии для решения задач идентификации и определения положения объектов // Информатизация и связь. 2021. № 5. С. 97—104.
10. Буряк Ю. И., Желтов С. Ю. RFID на службу сервиса авиатехники // Логистика. 2006. № 1(34). С. 22—23.
11. Зорин В. А., Баурова Н. И., Степанов П. В., Стыскин М. М., Трегубов П. Г. Система распознавания и мониторинга технического состояния наземных транспортно-технологических машин // Технология металлов. 2021. № 55. С. 44—49.

Сведения об авторах

- Валерий Вячеславович Захаров** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория автоматизации научных исследований, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; старший научный сотрудник; E-mail: valeriov@yandex.ru
- Антон Юрьевич Баранов** — Аспирант; Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория автоматизации научных исследований, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; младший научный сотрудник; E-mail: yuiomer1337@gmail.com
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория автоматизации научных исследований, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; главный научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Поступила в редакцию 02.09.22; одобрена после рецензирования 16.09.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Kulga K.S. *Automation and modern technologies*, 2006, no. 4, pp. 42–46. (in Russ.)
2. Chernyak L. *Open Systems*, 2003, no. 10, pp. 32–39. (in Russ.)
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
4. Ronzhin A.L., Sokolov B.V., Gao V.Yu.-D., Mironova E.G., Styskin M.M. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya*, 2020, no. 1, pp. 3–10. (in Russ.)
5. Mirotin L.B., Nekrasov A.G., Stepanov P.V., Tregubov P.G. *Herald of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2013, no. 3, pp. 34–36. (in Russ.)
6. Tregubov P.G. *Automation and Modeling in Design and Management*, 2014, no. 2, pp. 17–20. (in Russ.)
7. Stepanov P.V. *Informatization and communication*, 2022, no. 1, pp. 22–29. (in Russ.)
8. Stepanov P.V., Sokolov B.V. *IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*, St. Petersburg, 2021, pp. 195–198, DOI: 10.1109/CTS53513.2021.9562858.
9. Stepanov P.V. *Informatization and communication*, 2021, no. 5, pp. 97–104. (in Russ.)
10. Buryak Yu.I., Zheltov S.Yu. *Logistics*, 2006, no. 1(34), pp. 22–23. (in Russ.)
11. Zorin V.A., Baurova N.I., Stepanov P.V., Styskin M.M., Tregubov P.G. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, no. 55, pp. 44–49 (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|---------------------------|--|
| Valery V. Zakharov | — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Research Automation Laboratory; Senior Researcher; E-mail: valeriov@yandex.ru |
| Anton Yu. Baranov | — Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Research Automation Laboratory; Junior Researcher; E-mail: yuioomer1337@gmail.com |
| Boris V. Sokolov | — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation, Research Automation Laboratory; Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru |

Received 02.09.22; approved after reviewing 16.09.22; accepted for publication 27.12.22.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОТКАЗОВ ДАТЧИКОВ КВАДРОКОПТЕРА

С. А. Ким*, А. А. МАРГУН, А. А. ПЫРКИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*skimitmo@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача локализации отказов датчиков (акселерометра и гироскопа) беспилотного летательного аппарата типа „квадрокоптер“. Разработан алгоритм, обеспечивающий возможность детектирования и классификации отказов датчиков квадрокоптера с помощью методов машинного обучения. Для решения задачи использованы следующие методы машинного обучения: логистическая регрессия, метод случайного леса, LASSO и гребневая регрессии, а также эластичная сеть. Экспериментальные результаты, полученные в ходе компьютерного моделирования, подтверждают работоспособность предложенного алгоритма. Проведен сравнительный анализ используемых методов машинного обучения.

Ключевые слова: локализация отказов, квадрокоптер, БПЛА, логистическая регрессия, метод случайного леса, LASSO-регрессия, гребневая регрессия, эластичная сеть, акселерометр, гироскоп

Ссылка для цитирования: Ким С. А., Маргун А. А., Пыркин А. А. Применение методов машинного обучения для локализации отказов датчиков квадрокоптера // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 125—130. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-125-130.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS
TO LOCALIZE QUADCOPTER SENSOR FAILURES

S. A. Kim*, A. A. Margyn, A. A. Pyrkin

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*skimitmo@gmail.com

Abstract. The problem of localizing failures of sensors (accelerometer and gyroscope) of an unmanned aerial vehicle of the "quadcopter" type is considered. An algorithm is developed that provides the ability to detect and classify quadcopter sensor failures using machine learning methods. To solve the problem, the following machine learning methods were used: logistic regression, random forest method, LASSO and ridge regression, as well as elastic net. Experimental results obtained in the course of computer simulation confirm the efficiency of the proposed algorithm. A comparative analysis of the used methods of machine learning is performed.

Keywords: failure localization, quadcopter, UAV, logistic regression, random forest method, LASSO regression, ridge regression, elastic net, accelerometer, gyroscope

For citation: Kim S. A., Margyn A. A., Pyrkin A. A. Application of machine learning methods to localize quadcopter sensor failures. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 125—130 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-125-130.

Введение. Управление движением летательных аппаратов необходимо обеспечивать в условиях различных параметрических неопределенностей, воздействий нестационарной окружающей среды, а также шумов измерения. Помимо этого в процессе полета могут возникать различные нештатные ситуации, например, повреждения частей конструкции либо

отказы оборудования [1]. Часть из этих повреждений и отказов оказывает непосредственное влияние на динамические характеристики беспилотного летательного аппарата (БПЛА) как объекта управления. Поэтому существует потребность в методах и алгоритмах отказоустойчивой работы БПЛА.

Задача обеспечения отказоустойчивого управления разделяется на две части [1—5]. Первая касается реконфигурации алгоритмов управления движением БПЛА в случае отказа [6]; вторая — проблемы детектирования и локализации отказов.

В последнее время все более актуальна задача прогнозирования отказов оборудования с использованием методов машинного обучения [7] в таких областях, как: машиностроительное производство, транспортные системы, и другие области промышленности. Эффективность этих методов выше эффективности подходов, основанных на нечеткой логике и статистических методах. К преимуществам методов машинного обучения перед классическими математическими подходами можно отнести способность алгоритмов быстро обрабатывать большие объемы данных, кроме того, машинный алгоритм способен самостоятельно выявлять закономерности в данных. Оценочная точность модели — показатели количественные, поэтому на них можно ориентироваться в процессе принятия решений [8—10]. Ввиду описанных преимуществ целесообразно применять методы машинного обучения для повышения качества прогнозов отказов оборудования с целью снижения аварийности и затрат.

Ниже описаны основные принципы работы используемых в настоящей статье методов машинного обучения.

Метод логистической регрессии обычно используется для оценки вероятности того, что образец принадлежит к определенному классу [11].

Регрессия методом наименьшего абсолютного сокращения и выбора (*LASSO-регрессия*) — это вариант линейной регрессии, специально адаптированный для данных, которые демонстрируют сильную мультиколлинеарность. LASSO использует сжатие коэффициентов, которое добавляет регрессионным моделям несколько преимуществ:

- точные и стабильные оценки;
- уменьшение ошибок.

Гребневая регрессия, как и LASSO-регрессия, применяет сжатие. Оба алгоритма хорошо подходят для наборов данных с большим количеством признаков, которые не являются независимыми друг от друга (коллинеарность). Однако самое большое различие между ними состоит в том, что гребневая регрессия использует регуляризацию L2, т.е. ни один из коэффициентов не становится нулевым, как это происходит в LASSO-регрессии. Гребневую регрессию лучше использовать, когда необходимо сделать приоритетными большое количество переменных, эффект от каждой из которых невелик.

Эластичная сеть — „серединная точка“ между гребневой и LASSO-регрессией: член регуляризации представляет собой смесь членов регуляризации гребневой и LASSO-регрессии.

Постановка задачи. Процесс машинного обучения требует достаточно большого объема данных, соответствующих изучаемому режиму работы. Для сбора данных, соответствующих тем или иным отказам, необходимо выполнять наблюдения на протяжении длительного времени эксплуатации. Эта задача требует больших затрат ресурсов, из-за чего на практике зачастую недостаточно данных для построения точных и репрезентативных моделей машинного обучения. Решение о наличии отказа принимается путем сравнения показаний датчиков с их ожидаемыми величинами на основе номинальной модели. В том случае, когда отклонение превышает определенный уровень, в системе возникает отказ. Далее необходимо классифицировать отказ. Ожидаемые показатели датчиков могут быть получены путем компьютерного моделирования динамики квадрокоптера. Каждая из групп отказов по-своему влияет на динамику движения БПЛА, поэтому в предложенном алгоритме используются методы классификации, специфичные для каждой из групп отказов. Рассмотрим компьютерную модель

БПЛА, включающую акселерометр и гироскоп, затем сформируем набор данных, содержащий показания БПЛА для всех видов отказов и такое же количество данных в отсутствие отказов, для того чтобы избежать разбалансировки классов. Далее выполним предобработку полученных данных и построим модели с помощью различных алгоритмов машинного обучения.

Математическая модель квадрокоптера. Для начала рассмотрим математическую модель летательного аппарата типа „квадрокоптер“. Трехмерная модель квадрокоптера представлена на рис. 1, где F_i — силы тяги, производимые каждым из четырех двигателей; τ_i — вращающие моменты двигателей.

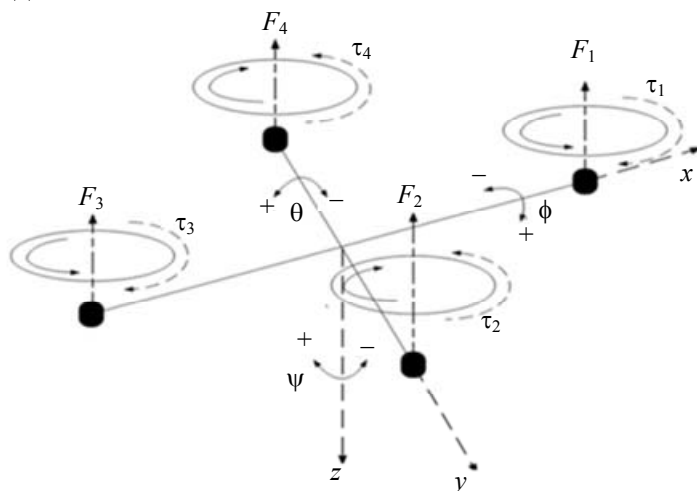


Рис. 1

Математическая модель движения квадрокоптера представлена в [2]. Модель динамики квадрокоптера в инерциальной системе координат описывается уравнениями:

$$\ddot{x} = -\frac{F_i}{m} [\sin\phi\sin\psi + \cos\phi\cos\psi\sin\theta], \quad (1)$$

$$\ddot{y} = -\frac{F_i}{m} [\cos\phi\sin\psi\sin\theta - \cos\psi\sin\phi], \quad (2)$$

$$\ddot{z} = g - \frac{F_i}{m} [\cos\phi\cos\theta], \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{I_y - I_z}{I_x} \theta \dot{\psi} + \frac{\tau_x}{I_x}, \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{I_z - I_x}{I_y} \phi \dot{\psi} + \frac{\tau_y}{I_y}, \quad (5)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{I_x - I_y}{I_z} \phi \dot{\theta} + \frac{\tau_z}{I_z}, \quad (6)$$

где x, y, z — линейные координаты в системе отсчета; ϕ, θ, ψ — углы крена, тангажа и рысканья; F_i — сила тяги; τ_x, τ_y, τ_z — вращающие моменты; m — масса квадрокоптера; g — ускорение свободного падения; I_x, I_y, I_z — моменты инерции по соответствующей оси квадрокоптера.

Типы отказов датчиков. Рассмотрим следующие виды отказов.

1. При полном выходе из строя датчика бортовая система БПЛА принимает нулевые значения вместо реальных показаний. В случае выхода из строя датчика соответствующая переменная ω_i принимает нулевое значение, т.е. $\omega_i = 0$.

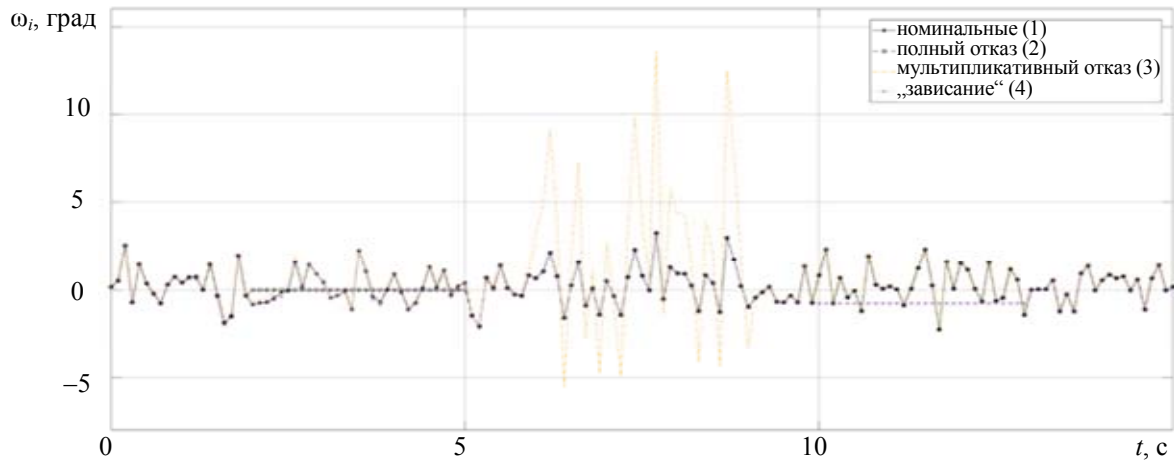


Рис. 2

2. При мультипликативном отказе датчика:

$$\omega_{\text{failure}}(t) = (1+\rho)\omega_{\text{nom}}(t) + \eta(t), \quad (7)$$

где $\omega_{\text{nom}}(t)$ — показания исправного датчика; ρ — мультипликативная постоянная (коэффициент); $\eta(t)$ — шум измерений.

3. „Замораживание“ показаний приводит к тому, что датчик постоянно показывает значения, соответствующие определенному прошлому моменту времени:

$$\omega_{\text{failure}}(t) = \omega_{\text{nom}}(t^*). \quad (8)$$

График показаний гироскопа при разных типах отказов представлен на рис. 2. Со 2-й по 5-ю секунду наблюдается полный отказ датчика (2), с 6-й по 9-ю секунду замечен мультипликативный отказ датчика (3) с $\rho=3$, с 10-й по 13-ю секунду видно „замораживание“ показаний датчика (4). В результате компьютерного моделирования были получены наборы данных по 50 датасетов для каждого типа отказов и такое же количество данных в случае безотказной работы для того, чтобы исключить разбалансировку классов. Перед тем как применять алгоритмы машинного обучения, полученные данные для разных типов отказов были преобразованы в табличное представление. Для того чтобы приблизить показания к реальным условиям эксплуатации, был добавлен белый гауссов шум при проведении измерений. В качестве целевых признаков использованы текущие показатели датчиков и их номинальные значения на основе идеализированной модели [12, 13]. Затем для увеличения числа данных был применен алгоритм аугментации. К данным были добавлены изменения сигналов датчиков в окне шириной в 1 с, шаг — 0,1 с. После процедуры аугментации размер полученных данных был увеличен вдвое.

Для обучения моделей были использованы 75 % данных, а остальные 25 % данных — в качестве тестовых. Исходные значения признаков могут изменяться в очень большом диапазоне и отличаться друг от друга на несколько порядков. Для этого проведем нормирование значений, это обеспечит корректную работу вычислительных алгоритмов. Так как квадрокоптер использует различные режимы полета, корректно заменить абсолютные значения нормализованными. Для этого используем нормализацию средним. Стандартизированная оценка величины x рассчитывается по формуле [14]:

$$z = \frac{x - \bar{X}}{S_x}, \quad (9)$$

где $\bar{X}$ — среднее значение, S_x — стандартные отклонения, вычисленные для множества данных x_i .

Далее на основе сформированного набора данных обучили модель с использованием метода логистической регрессии, случайного леса, LASSO и гребневой регрессии, а также эластичной сети.

Классификатор	Точность, о.е.	Полнота, о.е.	F-мера, о.е.
Метод случайного леса	0,86	0,87	0,86
Логистическая регрессия	0,76	0,76	0,76
LASSO-регрессия	0,76	0,78	0,77
Гребневая регрессия	0,87	0,88	0,87
Эластичная сеть	0,61	0,62	0,61

Оптимизация гиперпараметров позволяет добиться более высокого качества классификатора за счет изменения регулирующих его функционирование настроек.

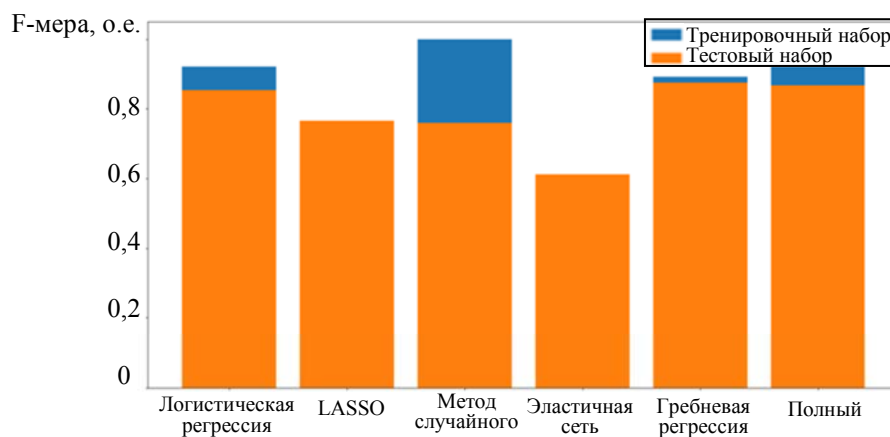


Рис. 3

В результате испытаний подобраны параметры с использованием метода GridSearchCV (из библиотеки sklearn), который обеспечивает поиск наилучших параметров модели методом перебора на заданной сетке.

Заключение. В статье предложен алгоритм локализации и классификации отказов датчиков БПЛА с использованием классических методов машинного обучения. Сравнение результатов работы алгоритмов показало, что наилучшие показатели F-меры на тестовом наборе данных обеспечивает метод гребневой регрессии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов Д. С., Тюменцев Ю. В. Нейросетевые методы обнаружения отказов датчиков и приводов летательного аппарата // Труды МАИ. 2012. Вып. 52.
2. Lee D., Burg T., Dawson D., Shu D., Xian B., and Tatlicioglu E. Robust tracking control of an underactuated quadrotor aerial-robot based on a parametric uncertain model // IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2009). 2009. P. 3187—3192.
3. Пыркин А. А., Мальцева Т. А., Лабадин Д. В., Суров М. О., Бобцов А. А. Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 4. С. 47—51.
4. Patan K. Artificial neural networks for the modeling and fault diagnosis of technical processes // Lecture Notes in Control and Information Sciences. Vol. 377. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 206 p.
5. Blanke M. et al. Diagnosis and fault-tolerant control. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 672 p.
6. Sobhani-Tehrani E., Khorasani K. Fault diagnosis of nonlinear systems using a hybrid approach // Lecture Notes in Control and Information Sciences. Vol. 383. NY: Springer-Verlag, 2009. 265 p.
7. Шаханов Н. И., Варфоломеев И. А., Юдина О. В., Еришов Е. В. Прогнозирование аномалий в работе натяжных устройств агрегата полимерных покрытий металла в условиях малого количества отказов // Программные продукты и среды. 2018. № 1(36). С. 212—217. DOI:10.15827/0236-235X.121.212-217.

8. Mian A. A., and Wang D. B. Dynamic modeling and nonlinear control strategy for an underactuated quad rotor rotorcraft // *Journal of Zhejiang University Science A*. 2008. Vol. 9, N 4. P. 539—545.
9. Min B. C., Cho C. H., Choi K. M. & Kim D. H. Development of a micro quad-rotor UAV for monitoring an Indoor environment // *Part of the Lecture Notes in Computer Science book series*. Vol. 5744. Advances in Robotics. P. 262—271.
10. Tayebi A. and McGilvray S. Attitude stabilization of a VTOL quadrotor aircraft // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2006. Vol. 14, N 3. P. 562—571.
11. Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных схем. М.: Вильямс, 2018. 187—189 с.
12. Chen J. and Patton R. J. *Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999. 356 p.
13. Wei W. DC Motor Parameter Identification Using Speed Step Responses // *Proc. of the 2010 American Control Conf.* 2010. P. 1937—1941.
14. Мельник М. Основы прикладной статистики. М.: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|--|
| Станислав Александрович Ким | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: skimitmo@gmail.com |
| Алексей Анатольевич Маргун | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: aamargun@itmo.ru |
| Антон Александрович Пыркин | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; декан факультета; E-mail: pyrkin@itmo.ru |

Поступила в редакцию 07.07.22; одобрена после рецензирования 23.11.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Kozlov D.S., Tyumentsev Y.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 52, <https://mai.ru/upload/iblock/0e5/neyrosetevye-metody-obnaruzheniya-otkazov-datchikov-i-privodov-letatel'nogo-apparata.pdf?referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fclck%2Fjsredir%3Ffrom%3Dyandex.ru%3Bsearch%2F%3Bweb%3B%3B>. (in Russ.)
2. Lee D., Burg T., Dawson D., Shu D., Xian B., and Tatlicioglu E. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, SMC 2009, 2009, pp. 3187–3192.
3. Pyrkin A.A., Maltseva T.A., Labadin D.V., Surov M.O., Bobtsov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, no. 4(56), pp. 47–51. (in Russ.)
4. Patan K. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol. 377, Berlin, Springer-Verlag, 2008, 206 p.
5. Blanke M. et al. *Diagnosis and fault-tolerant control*, Berlin, Springer-Verlag, 2006, 672 p.
6. Sobhani-Tehrani E., Khorasani K. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol. 383, NY, Springer-Verlag, 2009, 265 p.
7. Shakhnov N.I., Varfolomeev I.A., Yudina O.V., Ershov E.V. *Software products and environments*, 2018, no. 1(36), pp. 212–217, DOI:10.15827/0236-235X.121.212-217. (in Russ.)
8. Mian A.A. and Wang Dao-bo, *Journal of Zhejiang University Science A*, 2008, no. 4(9), pp. 539–545.
9. Min B.C., Cho C.H., Choi K.M. & Kim D.H. *Part of the Lecture Notes in Computer Science book series*, vol. 5744, Advances in Robotics, pp. 262–271.
10. Tayebi A., and McGilvray S. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, no. 3(14), pp. 562–571.
11. Giron A. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques for Building Intelligent Systems*, O'Reilly Media, Inc., 2019, pp. 187–189.
12. Chen J. and Patton R.J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999, 356 p.
13. Wei W. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 2010, pp. 1937–1941.
14. Melnik M. *Osnovy prikladnoy statistiki* (Fundamentals of Applied Statistics), Moscow, 1983, 416 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|-------------------------|--|
| Stanislav A. Kim | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: skimitmo@gmail.com |
| Alexey A. Margun | — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: aamargun@itmo.ru |
| Anton A. Pyrkin | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Dean of the Faculty; E-mail: pyrkin@itmo.ru |

Received 07.07.22; approved after reviewing 23.11.22; accepted for publication 27.12.22.

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL ENVIRONMENT,
SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 620.1.08; 614.841.1
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138

**КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ
ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

А. С. ГОРБУНОВ*, М. В. ЕЛФИМОВА, Ю. Н. БЕЗБОРОДОВ

*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Железногорск, Красноярский край, Россия
gorbunovgps@mail.ru*

Аннотация. Приведены результаты исследования образцов древесины (сорт — сосна) при термическом воздействии в муфельной печи. Исследование выполнено путем измерения цветовых характеристик с использованием модели разложения цвета на RGB-составляющие. При термическом воздействии в древесине происходят изменения, обусловленные химическими и физическими процессами. Время и температура являются показателями степени термического повреждения. Экспериментально в системе RGB установлены зависимости изменения цветовых характеристик образцов древесины от температуры и времени воздействия. Предложен критерий контроля степени термических повреждений, разработан прибор для реализации метода. Прибор основан на датчике цвета TCS3472 и программируемом логическом контроллере. Полученные данные могут быть использованы при расследовании пожаров на объектах, выполненных из деревянных конструкций, при исследовании путей распространения пожара, а также контроля степени термических повреждений древесины при различных технологических процессах.

Ключевые слова: RGB, цветовые характеристики, степень термических повреждений, древесина

Ссылка для цитирования: Горбунов А. С., Елфимова М. В., Безбородов Ю. Н. Контроль степени термических повреждений древесины путем измерения цветовых характеристик // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 131—138. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138.

**MONITORING THE DEGREE OF WOOD THERMAL DAMAGE
BY MEASURING ITS COLOR CHARACTERISTICS**

A. S. Gorbunov*, M. V. Elfimova, Yu. N. Bezrodov

*Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, Russia
gorbunovgps@mail.ru*

Abstract. Results of study of wood samples (variety – pine) under thermal exposure in a muffle furnace are presented. The research is carried out by measuring color characteristics using a color decomposition model into RGB components. Under thermal exposure, changes occur in wood due to chemical and physical processes. Time and temperature are indicators of the degree of thermal damage. Dependences of changes in wood samples color characteristics in the RGB system on temperature and exposure time are established experimentally. A criterion for controlling the thermal damage degree is proposed, and a device is developed to implement the method. The device is based on the TCS3472 color sensor and a programmable logic controller. The data obtained can be used in investigations of fires at objects made of wooden structures, in the study of fire propagation paths, as well as in monitoring the degree of thermal damage to wood during various technological processes.

Keywords: RGB, color characteristics, degree of thermal damage, wood

© Горбунов А. С., Елфимова М. В., Безбородов Ю. Н., 2023

For citation: Gorbunov A. S., Elfimova M. V., Bezrodov Yu. N. Monitoring the degree of wood thermal damage by measuring its color characteristics. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 131—138 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138.

При термическом воздействии происходят [1] изменения физических свойств и химического состава материала, зависящие от температуры и длительности воздействия. Эти изменения можно описать с помощью параметра „степень термических повреждений“.

Степень термического повреждения материала возможно описать качественно или количественно [1—3]. В большинстве случаев специалисты при расследовании пожаров используют качественную оценку, описывая внешний вид (потемнения, вид угля, частичное уничтожение). Однако существуют методы определения степени термических повреждений древесины непосредственно на пожаре с помощью приборов, к ним относятся измерение глубины обугливания [4], а также измерение электросопротивления обугленных остатков древесины [5]. Эти методы предполагают работу только с обугленными фрагментами древесины. Часто физико-химические изменения находящейся на путях распространения огня древесины происходят только на поверхности (в тонком слое), без глубоких структурных изменений, что делает невозможным применение данных методов исследования.

Древесина используется в качестве топлива, строительного материала, орудий труда, при создании бумаги, мебели, предметов искусства и т.д. [6, 7]. Благодаря эксплуатационным показателям и физическим свойствам древесина активно используется в строительстве, что, в свою очередь, позволяет использовать ее в качестве объекта исследования при расследовании и экспертизе пожаров. Целью настоящей работы является установление в системе RGB образцов экспериментальных зависимостей изменений цветовых характеристик древесины от температуры и времени воздействия.

В задачи исследования входят:

- 1) подготовка образцов термически поврежденной древесины в лабораторных условиях при различных температурах и времени воздействия;
- 2) измерение цветовых характеристик в системе RGB;
- 3) установление зависимости изменений цветовых характеристик образцов древесины от температуры и времени воздействия.

При термической деструкции изменяются цвет древесины, глубина обугливания, а также физические свойства, которые зависят от состава и химических процессов, происходящих в материале. При температуре от 120 до 150 °С поверхность древесины желтеет, от 150 до 200 °С — становится коричневой, дальнейший нагрев приводит к обугливанию (черный цвет) [8].

Для определения цвета в численных значениях используют колориметры. При проведении исследования в настоящей работе применялся прибор контроля степени термических повреждений путем цветоизмерения, основанный на датчике цвета TCS3472 [9]. Прибор состоит из датчика цвета TCS3472, шлейфа проводников, программируемого логического контроллера, ЖК-дисплея, корпуса прибора (в виде изолированной от внешних условий измерительной камеры на телескопической штанге) с источником питания. Прибор позволяет определять цветовые характеристики предметов и конструкций для оценки степени их термических повреждений вследствие пожара.

Прибор работает в цветовой системе координат RGB со значениями цветовых характеристик от 0 до 255 [10]. В приборе реализована функция определения интенсивности отраженного света C . При использовании этой модели любой цвет может быть представлен в цветовом пространстве с помощью вектора (рис. 1). При этом направление вектора характеризует цветность, а его модуль ($|C|$) отражает яркость:

$$|C| = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}, \quad (1)$$

где R — значение красного цвета; G — зеленого; B — синего.

Таким образом, важным показателем для оценки термических повреждений материалов является яркость, т.е. расположение точки цвета ближе к черному оттенку (цвету карбонизированных продуктов).

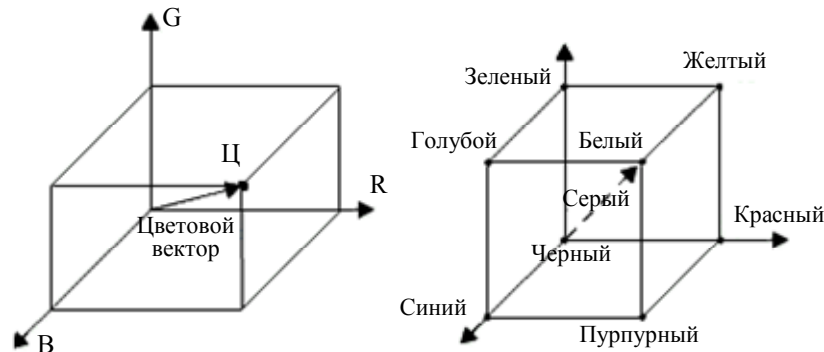


Рис. 1

Достоверность показаний прибора при оценке степени термических повреждений путем цветоизмерения с помощью датчика цвета TCS3472 оценивалась из сопоставления результатов с координатами цвета, характерных для эталонов белого, черного и зеленого цвета с учетом погрешности.

Для калибровки датчика и вычисления погрешностей использовалось программное обеспечение фирмы TAOS [9]: относительная погрешность прибора после калибровки не превышает 5,8 %.

Объектами исследования является прямослойная воздушно-сухая древесина сорта „сосна“ в виде прямоугольных брусков с размерами 25×50×150 мм. Образцы древесины без видимых пороков и смоляных включений; боковые поверхности образцов остроганы, торцы опилены и обработаны напильником. Перед исследованием образцы в течение 8 ч находились в сушильном шкафу при температуре 50 °С.

Образцы были разделены для семи серий исследований (по три образца в каждой). На образцы воздействовали температурой от 100 до 400 °С (с шагом в 50 °С для одной серии исследования) в течение 10, 20 и 30 мин; образцы по одному извлекались из муфельной печи по достижении времени обработки. Однако во время проведения эксперимента появилась необходимость увеличить число серий исследования в диапазоне 200—250 °С для выявления момента начала пиролиза древесины: было добавлено еще две серии (по три образца) при температуре 220 и 230 °С. Охлаждение происходило естественным путем в помещении.

Визуальные признаки термических повреждений исследуемых образцов представлены на рис. 2. Цвет древесины начинает изменяться при температуре свыше 150 °С. При температуре выше 350 °С на поверхности образцов начинает образовываться обугленный остаток. Изменение внешнего вида зависит от времени и температуры воздействия: с увеличением этих показателей термические повреждения, проявляющиеся в виде потемнения и обугливания, усиливаются.

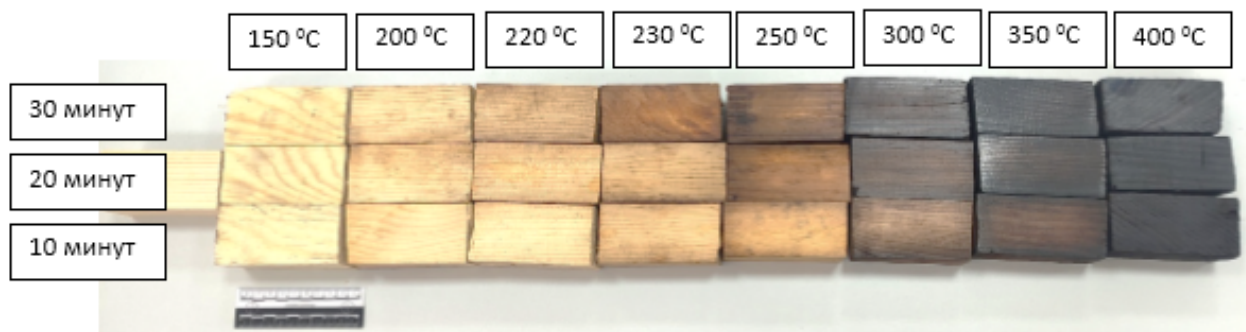


Рис. 2

В процессе измерения разработанный прибор автоматически с небольшим интервалом проводит десять замеров в одной точке при неизменном положении датчика; заложенная программа выдает в качестве результата среднее арифметическое значение показателей цвета. После усреднения результаты индивидуальных измерений отбрасываются и недоступны для анализа. Далее на основании пяти ручных замеров в различных областях одного образца берется среднее арифметическое значение, которое и считается за результат. Области на образце выбираются так, чтобы не иметь визуально определяемых особенностей (наличия сучков, изменения цвета или текстуры).

Результаты измерений были статистически обработаны по методике ГОСТ Р 50779.22–2005*. На основании центральной предельной теоремы теории вероятности можно сделать обоснованное предположение о нормальности распределения измеряемых значений. В доверительные интервалы укладывается 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 5 %. Средние значения измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Средние значения цветовых характеристик
образцов древесины**

№ образца	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{мин}$	R	G	B	C, люкс	Ц
1	100	10	200	158	124	772	283
2	150	10	190	150	112	728	267
3	200	10	186	134	98	665	249
4	220	10	174	125	90	630	232
5	230	10	168	118	82	580	221
6	250	10	147	96	65	489	187
7	300	10	73	50	40	259	97
8	350	10	32	24	21	125	45
9	400	10	18	19	19	94	32
10	100	20	200	158	124	772	283
11	150	20	190	150	113	728	267
12	200	20	170	121	87	601	226
13	220	20	161	107	76	549	208
14	230	20	147	99	71	503	191
15	250	20	65	38	29	208	81
16	300	20	32	25	22	127	46
17	350	20	27	24	21	120	42
18	400	20	19	20	20	96	34
19	100	30	202	158	124	772	285
20	150	30	194	148	108	718	267
21	200	30	171	120	86	595	226
22	220	30	132	86	62	443	169
23	230	30	74	43	37	232	93
24	250	30	59	36	27	193	74
25	300	30	26	29	21	118	44
26	350	30	24	22	20	113	38
27	400	30	19	20	20	99	34

Ввиду нелинейности функции для описания полученных зависимостей использовалась логистическая кривая вида:

$$\Pi(t) = \frac{\Pi_{\max} - \Pi_{\min}}{1 + e^{k(t-t_0)}} + \Pi_{\min}, \quad (2)$$

* ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980) Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. 31 мая 2005. <https://docs.cntd.ru/document/1200039939>.

где в качестве $\Pi_{\max}$ и $\Pi_{\min}$ брались максимальные и минимальные экспериментальные значения зависимой переменной (модуля цветового вектора); t_0 — абсцисса (температура) точки перегиба определялась визуально по графику; k — значение производной в точке t_0 (подбиралось путем компьютерного перебора в диапазоне значений от 0,01 до 0,1 по сетке с шагом 0,01 с целью максимизации коэффициента детерминации (R^2) линейной зависимости экспериментальных и подобранных значений. Уравнения зависимости модуля цветового вектора от температуры (табл. 2) были подобраны „вручную“ с помощью Microsoft Excel. Так как фактические значения F-критерия Фишера больше табличного при уровне значимости 0,05, то полученные уравнения и показатели тесноты связи являются статистически значимыми.

Таблица 2

Уравнения зависимости модуля цветового вектора образцов древесины от температуры и времени

№	T , мин (при 100—400 °C)	Уравнение зависимости	R^2	F-критерий Фишера
1	10	$ \Pi = \frac{251}{1 + e^{0,03(t-260)}} + 32$	0,9955	1548,56
2	20	$ \Pi = \frac{249}{1 + e^{0,06(t-230)}} + 34$	0,9771	298,68
3	30	$ \Pi = \frac{251}{1 + e^{0,07(t-220)}} + 34$	0,9878	566,77

Из рис. 3, 4 и 5 представлена зависимость модуля цветового вектора от воздействия температуры в течение 10, 20 и 30 мин на образцы древесины. Видно, что при увеличении температуры показатели RGB, а также $|\Pi|$ уменьшаются в пределах от 100 до 350 °C. Также графики для времени температурного воздействия 20 и 30 мин практически совпадают, что говорит о более существенном влиянии температуры по сравнению с длительностью воздействия.

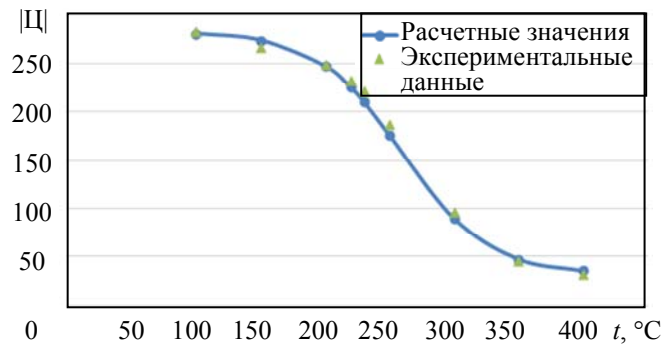


Рис. 3

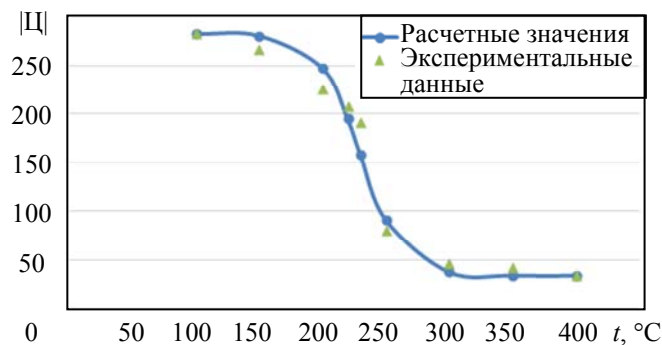


Рис. 4

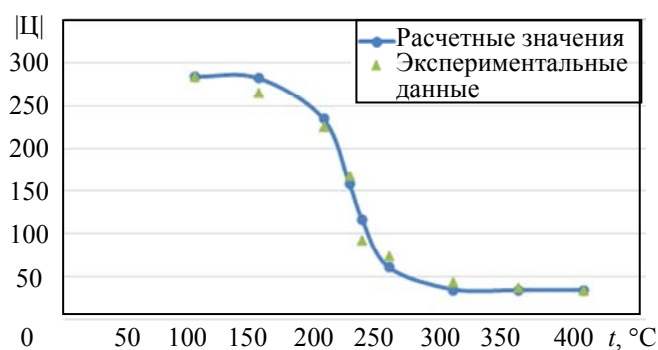


Рис. 5

Как известно, древесина является природным полимером, ее основные компоненты — целлюлоза (70—75 %) и гемицеллюлоза, а также лигнин (25—30 %) [11].

Полученные данные отражают химические и физические процессы, происходящие в древесине при термическом воздействии. Процесс термического разложения древесины протекает в несколько этапов. На первом этапе — до 125 °С — из древесины испаряется влага. При повышении температуры начинают выделяться горючие летучие компоненты [12]. Чем выше температура нагрева, тем более существенные внешние изменения претерпевает древесина. При температуре от 300 до 350 °С древесина теряет цвет и обугливается по поверхности в течение нескольких минут. Гемицеллюлоза разлагается с выделением летучих продуктов при температуре от 200 до 260 °С, целлюлоза — от 240 до 350 °С, лигнин — от 280 до 500 °С. Эти диапазоны температур приведены по данным термогравиметрического анализа [13].

В [14] отмечается, что при температуре, приближающейся к 200 °С, заметно снижается степень полимеризации полисахаридов, особенно гемицеллюлоз, происходят плавление лигнина и его конденсация. При температуре свыше 300 °С обычная структура древесины полностью исчезает, уступая место газообразным продуктам термической деструкции.

Таким образом, возможно сравнивать степень термического повреждения древесины разработанным инструментальным методом с использованием колориметрии. Однако температурные пределы этого метода ограничены, с одной стороны, началом испарения влаги (150 °С), а с другой — началом процесса карбонизации (350 °С).

Научная новизна работы заключается в предложенном методе оценки степени термических повреждений древесины, а также в установлении зависимостей изменения цветовых характеристик от температуры и времени воздействия. Предложенный метод позволяет контролировать и оценивать степень термических повреждений древесины в различных отраслях (сушка, обработка), а также при расследовании пожаров, в установлении путей распространения горения. Визуальный метод имеет ряд недостатков, связанных со световыми эффектами и различными условиями наблюдения (угол падения света, освещенность, индивидуальная чувствительность зрения). Предложенный метод позволяет исключить влияние различных субъективных факторов и проводить измерения в одинаковых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). СПб: СПб ИПБ МВД РФ, 1997. 562 с.
2. NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations. 2004 [Электронный ресурс]: <https://niordc.ir/uploads/nfpa_921_-_2004.pdf>.
3. Мегорский Б. В. Методика установления причин пожаров. М.: Стройиздат, 1966. 347 с.
4. Чешко И. Д. Технические основы расследования пожаров: Методическое пособие. М.: ВНИИПО, 2002. 330 с.
5. Чешко И. Д., Егоров Б. С., Голяев В. Г., Смирнов К. П. Экспертное исследование обугленных остатков древесины с целью установления условий теплового воздействия и выявления очаговых признаков пожара // Экспертная техника. М.: ВНИИСЭ МЮ СССР. 1987. Вып. 99. С. 3—37.

6. Wang L., Toppinen A., Juslin H. Use of wood in green building: A study of expert perspectives from the UK // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 65. P. 350—361.
7. Ramage M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 68. P. 333—359.
8. Горбунов А. С., Слепов А. Н., Пожаркова И. Н. Возможность применения оптического прибора для определения цвета в экспертизе пожаров // *Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. Железнодорожск, 23 апреля 2021 г.* С. 616—619.
9. Паспорт на датчик цвета TCS34725 [Электронный ресурс]: <<https://natural-https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TCS34725.pdf>>. (дата обращения: 27.06.2022).
10. Schwarz M. W., Cowan W. B., Beatty J. C. An experimental comparison of RGB, YIQ, LAB, HSV, and opponent color models // *ACM Transactions on Graphics (tog)*. 1987. Vol. 6, N 2. P. 123—158.
11. Пожаровзрывоопасность веществ, материалов и средства их тушения: Справ. изд. / Под ред. А. Н. Баратова и А. Я. Корольченко. М.: Химия, 1990.
12. Левин Э. Д., Барабаш Н. Д., Морозов В. А. Химия древесины. Рига: Зинатне, 1969. С. 135—139.
13. Марьяндышев П. А. и др. Термогравиметрическое исследование процесса термического разложения и горения древесного топлива, углей и гидролизного лигнина // *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 5. С. 26—31.
14. Попова Л. Г. Исследование некоторых вопросов механизма образования древесного угля. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: Лесотехническая академия им. Кирова, 1970. 15 с.

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Горбунов

— Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; кафедра инженерно-технических экспертиз и криминалистики; преподаватель;
E-mail: gorbunovgps@mail.ru

Марина Владимировна Елфимова

— канд. техн. наук, доцент; Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; кафедра инженерно-технических экспертиз и криминалистики;
E-mail: elfimar@mail.ru

Юрий Николаевич Безбородов

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; научно-технический центр; старший научный сотрудник

Поступила в редакцию 28.06.22; одобрена после рецензирования 05.10.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Cheshko I.D. *Ekspertiza pozharov (ob"yekty, metody, metodiki issledovaniya)* (Examination of Fires (Objects, Methods, Research Methods)), St. Petersburg, 1997, 562 p. (in Russ.)
2. *NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2004, https://niordc.ir/uploads/nfpa_921_-_2004.pdf.
3. Megorskiy B.V. *Metodika ustanovleniya prichin pozharov* (Methodology for Establishing the Causes of Fires), Moscow, 1966, 347 p. (in Russ.)
4. Cheshko I.D. *Tekhnicheskiye osnovy rassledovaniya pozharov* (Technical Basics of Fire Investigation), Moscow, 2002, 330 p. (in Russ.)
5. Cheshko I.D., Egorov B.S., Golyaev V.G., Smirnov K.P. *Expert technique*, Moscow, 1987, no. 99, pp. 3—37. (in Russ.)
6. Wang L., Toppinen A., Juslin H. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 65 pp. 350—361.
7. Ramage M.H. et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68, pp. 333—359.
8. Gorbunov A.S., Slepov A.N., Pozharkova I.N. *Aktual'nyye problemy obespecheniya pozharoy bezopasnosti i zashchity ot chrezvychaynykh situatsiy* (Actual Problems of Ensuring Fire Safety and Protection from Emergen-

- cies), Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Zheleznogorsk, April 23, 2021, pp. 616–619. (in Russ.)
9. <https://natural-https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TCS34725.pdf>. (in Russ.)
 10. Schwarz M.W., Cowan W.B., Beatty J.C. *ACM Transactions on Graphics* (tog), 1987, no. 2(6), pp. 123–158.
 11. Baratov A.N. and Korolchenko A.Ya., ed., *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv, materialov i sredstva ikh tusheniya: Spravochnik* (Fire and Explosion Hazard of Substances, Materials and Their Extinguishing Agents: A Handbook), Moscow, 1990. (in Russ.)
 12. Levin E.D., Barabash N.D., Morozov V.A. *Khimiya drevesiny* (Chemistry of Wood), Riga, 1969, pp. 135–139. (in Russ.)
 13. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Lyubov V.K. *Modern High Technologies*, 2015, no. 5, pp. 26–31. (in Russ.)
 14. Popova L.G. *Issledovaniye nekotorykh voprosov mekhanizma obrazovaniya drevesnogo uglya* (Study of Some Questions of the Mechanism of Formation of Charcoal), Extended abstract of candidate's thesis, Leningrad, 1970, 15 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|--|
| Alexander S. Gorbunov | — | Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM; Department of Engineering and Technical Expertise and Forensic Science; Lecturer;
E-mail: gorbunovgps@mail.ru |
| Marina V. Elfimova | — | PhD, Associate Professor; Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM; Department of Engineering and Technical Expertise and Forensic Science; E-mail: elfimar@mail.ru |
| Yury N. Bezborodov | — | Dr. Sci., Professor; Siberian Fire Rescue Academy of Russian SFS EMERCOM; Scientific and Technical Center; Senior Researcher |

Received 28.06.22; approved after reviewing 05.10.22; accepted for publication 27.12.22.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. С. КОВАЛЕВИЧ^{*1}, И. Ю. КИНЖАГУЛОВ¹, К. А. СТЕПАНОВА², Д. О. КУЗИВАНОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

^{*}kovalevi4.a.s@gmail.com

²Научно-технический центр „Эталон“, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследована кинетика разрушения металлических изделий, выполненных с использованием технологий аддитивного производства, а именно селективным лазерным плавлением. Особенности процесса изготовления изделий данным методом приводят к образованию в материале различного рода структурных неоднородностей, которые, в свою очередь, влияют на прочностные характеристики. Использование метода акустической эмиссии при исследовании кинетики разрушения позволяет выявлять в материале зарождение процессов усталостного разрушения.

Ключевые слова: аддитивные технологии, акустическая эмиссия, неразрушающий контроль, селективное лазерное плавление, малоцикловая усталостность

Ссылка для цитирования: Ковалевич А. С., Кинжагулов И. Ю., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Экспериментальное исследование параметров акустической эмиссии при циклических испытаниях металлических изделий аддитивного производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 139—147. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-139-147.

EXPERIMENTAL STUDY OF ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS DURING CYCLIC TESTING OF METAL PRODUCTS OF ADDITIVE MANUFACTURING

A. S. Kovalevich^{*1}, I. Yu. Kinzhagulov¹, K. A. Stepanova², D. O. Kuzivanov¹

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

^{*}kovalevi4.a.s@gmail.com

²Scientific and Technical Center Etalon, St. Petersburg, Russia

Abstract. The kinetics of destruction of metal products made using additive manufacturing technologies, namely, selective laser melting, is studied. Features of this method of products manufacturing process give rise to various kinds of structural inhomogeneities in the material, which, in turn, affect the strength characteristics. The use of the acoustic emission method in the study of fracture kinetics makes it possible to reveal the initiation of fatigue fracture processes in the material.

Keywords: additive technologies, acoustic emission, non-destructive testing, selective laser melting, low-cycle fatigue

For citation: Kovalevich A. S., Kinzhagulov I. Yu., Stepanova K. A., Kuzivanov D. O. Experimental study of acoustic emission parameters during cyclic testing of metal products of additive manufacturing. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 139—147 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-139-147.

Введение. В настоящее время технологии аддитивного производства активно развиваются и находят широкое применение в различных областях промышленности, таких как авиа- и ракетостроение, судо- и машиностроение, автомобильная промышленность [1, 2]. Этот способ изготовления изделий перешел от стадии прототипирования, выпуска экспериментальных образцов и единичных изделий к полноценному серийному промышленному производству изделий. По мнению отдельных ученых и специалистов, в обозримом будущем эти технологии заменят традиционные технологии литья, обработки давлением и резанием. В

пользу этого свидетельствуют успешное применение продуктов аддитивных технологий в реальных объектах техники, а также высокая эффективность новой технологии в конструировании — возможность замены десятков деталей, собираемых в сборочную единицу, на цельное изделие, полученное в одном производственном цикле [3].

Преимущества аддитивных технологий — экономия сырья при производстве деталей, изготовление деталей сложной геометрии, сокращение временных затрат между этапами прототипирования и получения конечного изделия, уникальность характеристик получаемой продукции, придание направленной анизотропии материалу — обуславливают их активное внедрение [4].

Однако наряду с преимуществами этому способу изготовления изделий присущ и ряд недостатков: неоднородность материала получаемого изделия [5—7], высокая стоимость сырья, ограниченный размер изделий.

Специфика процесса получения изделий технологиями аддитивного производства определяет наличие в материале (детали) различных структурных неоднородностей.

Одной из главных закономерностей, установленных при изучении прочностных свойств порошковых металлических материалов, является резкое снижение предельных характеристик прочности, пластичности и разрушение изделия с увеличением размера дефектов.

В работе исследуются зависимости изменения параметров сигналов акустической эмиссии от протекающих в материале процессов [8—12], это обеспечило возможность обнаружения дефектов в материале.

Методика проведения исследований. Развитие дефектов в изделиях аддитивного производства выявлялось с применением средств акустико-эмиссионного контроля (рис. 1), включающих:

- модуль регистрации акустико-эмиссионной информации, включающий систему СЦАД-16.10, собранную на базе промышленной рабочей станции с двумя измерительными платами по четыре канала в каждой, и программное обеспечение, предназначенное для сбора, обработки, хранения и отображения данных, накопленных при проведении контроля;

- комплект преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), предназначенный для регистрации и преобразования в электрический сигнал энергии упругих механических волн, распространяющихся от места зарождения и развития дефекта в объекте контроля.

Для регистрации сигналов акустической эмиссии в ходе АЭ-контроля с помощью программы нагружения объектов контроля использовалась универсальная испытательная машина LFM-150 кН (рис. 2).



Рис. 1



Рис. 2

Для экспериментальных исследований акустико-эмиссионного контроля качества изделий, выполненных селективным лазерным сплавлением, были изготовлены экспериментальные образцы с имитацией внутренних макро- и микродефектов типа „усадочные пустоты“ (раковины, пористость) и „трещины“. Экспериментальные образцы (2 шт.) для циклических испытаний были изготовлены из материала Inconel 718 согласно требованиям ГОСТ 1497-84 с имитацией в рабочей части микро- и макродефектов (рис. 3, табл. 1).



Рис. 3

Таблица 1

Экспериментальные образцы для циклических испытаний на растяжение

Номер образца	Описание (указаны размеры CAD-моделей образцов)	Название CAD-модели	Чертеж рабочей части образцов с дефектами
I-0-1 I-0-2	Пропорциональный плоский образец без дефектов	Образец пропорциональный плоский	
II-45°-1 II-45°-2	С треугольной призмой внутри рабочей части образца: протяженность 10 мм, угол при вершине 45°, длина грани основания призмы 3 мм	Пластина с внутренним дефектом	
II-20°-1 II-20°-2	С треугольной призмой в рабочей части образца: протяженность 10 мм, угол при вершине 20°, длина грани основания призмы 3 мм	Пластина с дефектом на поверхности с углом 20 градусов	
III-0,2C-1 III-0,2C-2	С имитацией пористости с рабочей части образца с диаметром сфер, имитирующих поры $d = 0,2$ мм	Пластина со сферами $d = 0,2$ мм	

Степень влияния микро- и макродефектов на прочностные свойства изделий экспериментально оценивалась в ходе статических испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84 для оценки:

- предела текучести условного $\sigma_{0,2}$;
- предела прочности (временного сопротивления) σ_B ;
- относительного удлинения δ .

На рис. 4 приведена диаграмма нагружения при испытаниях объектов контроля. Сбор АЭ-данных осуществлялся непрерывно во время каждого этапа нагружения.

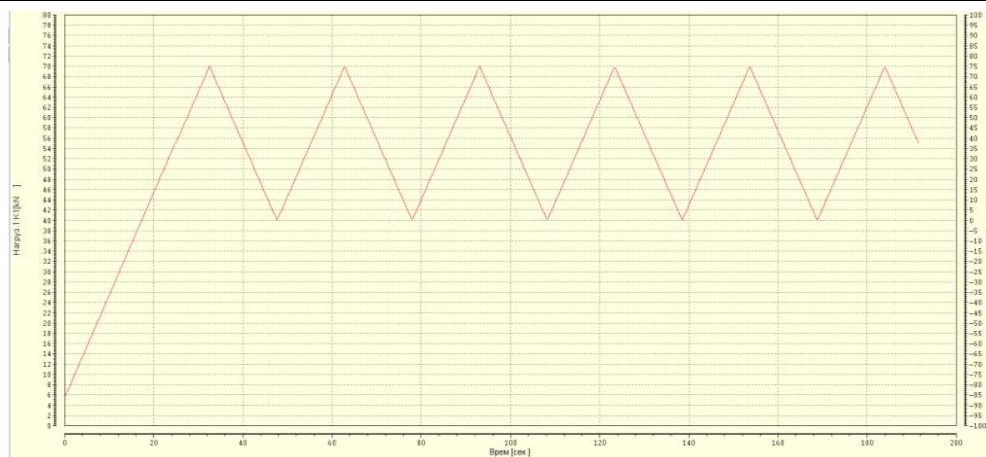


Рис. 4

Результаты. В ходе экспериментальных исследований относительное удлинение δ бездефектного образца составило 9,0 %. Разрушение образца произошло при нагрузке 153 кН на этапе нагружения до 155 кН.

В ходе циклических испытаний образца П-20°-1 относительное удлинение δ составило 1,7 %. Разрушение образца произошло на втором цикле испытаний при условиях нагружения: 105 ± 15 кН, максимальная нагрузка до разрушения составила $F_{\max} = 120$ кН. Разрушение произошло в месте расположения искусственно заложенного дефекта.

В ходе проведения испытаний на малоцикловую усталость до разрушения образца П-45°-1 относительное удлинение δ составило 2,1 %. Разрушение образца произошло в ходе первого этапа испытаний при условиях нагружения: 110 ± 15 кН, максимальная нагрузка до разрушения составила 123 кН. Разрушение произошло в месте расположения искусственно заложенного дефекта.

Относительное удлинение образца III-0,2С-1 δ составило 8,7 %. Разрушение образца произошло при нагрузке 157 кН на этапе нагружения до 155 кН.

Механические характеристики, полученные в ходе испытаний, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний по определению предела прочности

Номер образца	Число циклов до разрушения	$\sigma_{0,2}$, МПа	$F_{\max}$, кН	σ_B , МПа	$\Delta\sigma$, %	δ , %
I-0-2	60	972	153	1093	2,4	9,0
I-0-3	75		157	1120	0	10,1
II-20°-1	42	764	120	857	23,5	1,7
II-20°-2	50		125	893	20,3	2,2
II-45°-1	45	782	123	879	21,5	2,1
II-45°-2	44		122	872	22,1	2,0
III-0,2С-1	72	951	157	1121	0	8,7
III-0,2С-2	70		148	1068	4,6	8,7

В результате испытаний установлено, что разность расчетных и экспериментальных значений прочностных характеристик ($\sigma_{0,2}$, σ_B) составила ≈ 10 %, что обусловлено изменением фактических размеров внутренних дефектов относительно закладываемых в САД-моделях прототипов образцов для последующего выращивания методом SLM, а также наличием порошковых гранул в закрытых полостях имитаторов дефектов, претерпевающих частичное расплавление на границе сплавления.

Отмечено, что имитация пористости путем периодического расположения сферических полостей в рабочей части позволила улучшить характеристики пластичности образцов ($\sigma_{0,2}$, δ) с сохранением предела прочности на уровне основного металла.

Число импульсов АЭ, зарегистрированных на этапах испытаний образцов при нагружении ($+\Delta P$) и разгрузке ($-\Delta P$), представлено в табл. 3.

Таблица 3

Статистические результаты испытаний образцов

Номер этапа	$P_0 \pm \Delta P/2$, кН	Число импульсов АЭ N_Σ							
		I-0-2		II-20°-1		II-45°-1		III-0,2C-1	
		$+\Delta P$	$-\Delta P$	$+\Delta P$	$-\Delta P$	$+\Delta P$	$-\Delta P$	$+\Delta P$	$-\Delta P$
1	50±15	440	—	2143	400	271	122	816	212
2	55±15	1214	—	119	62	340	114	460	115
3	65±15	201	—	230	54	970	374	374	109
4	80±15	634	250	793	223	1251	430	332	90
5	85±15	76	12	405	94	211	114	845	92
6	90±15	149	116	59	15	501	265	325	105
7	95±15	80	29	330	64	280	154	293	72
8	100±15	71	45	65	17	239	70	318	88
9	105±15	183	55	117	6	430	164	270	90
10	110±15	31	6					297	107
11	115±15	82	17					77	8
12	120±15	45	8					245	60
13	125±15	110	21					284	45
14	130±15	137	26					98	5
15	135±15							255	25

Анализ распределения основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуда U_m , энергия $E_{AЭ}$, активность $\dot{N}_\Sigma$, доминантная частота f_d) выполнялся для каждого этапа нагружения.

На рис. 5 приведены диаграммы распределения средней активности $\dot{N}_\Sigma$ на этапах испытаний образцов (n — номер этапа и цикла нагружения): a — I-0-2; b — I-0-3; $в$ — II-20°-1; $г$ — II-20°-2; $д$ — II-45°-1; e — III-0,2C-1. На рис. 6 представлены диаграммы распределения амплитуды импульсов АЭ U_m на этапах испытаний, предшествующих разрушению образцов: a — I-0-2; b — II-20°-1; $в$ — II-45°-1. Распределение амплитуды импульсов АЭ U_m на этапе испытаний, при котором произошло разрушение образцов, проиллюстрировано на рис. 7: a — I-0-2; b — I-0-3; $в$ — II-20°-1; $г$ — II-20°-2; $д$ — II-45°-1; e — III-0,2C-1.

Установлено, что активность АЭ $\dot{N}_\Sigma$ в момент разрушения образцов без дефектов и с имитацией внутренних дефектов более чем в два раза превышает среднюю активность АЭ в предшествующих циклах $\dot{N}_\Sigma$. Однако данное явление не выявлено при разрушении образцов с дефектом, выходящим на поверхность. Отличительное свойство этих образцов — отсутствие заполнения областей несплошностей порошковыми гранулами.

Вследствие движения порошковых гранул в результате деформации рабочей части образца под нагрузкой происходит трение частиц между собой и со сплавленным металлом. Аналогично явлениям трения и зернограницного скольжения в объеме деформируемых жаропрочных сплавов данные процессы являются источниками АЭ и сопровождаются генерацией акустических импульсов.

Наличие большого числа элементарных источников АЭ, локализованных на относительно малом участке (в области несплошностей) рабочей части образца, сопровождается генерацией сигнала АЭ вследствие их взаимодействия. Этот фактор обуславливает повышение средних значений активности в области экстремумов диаграммы нагружения, а также приводит к изменению частотно-энергетических параметров АЭ-сигналов.

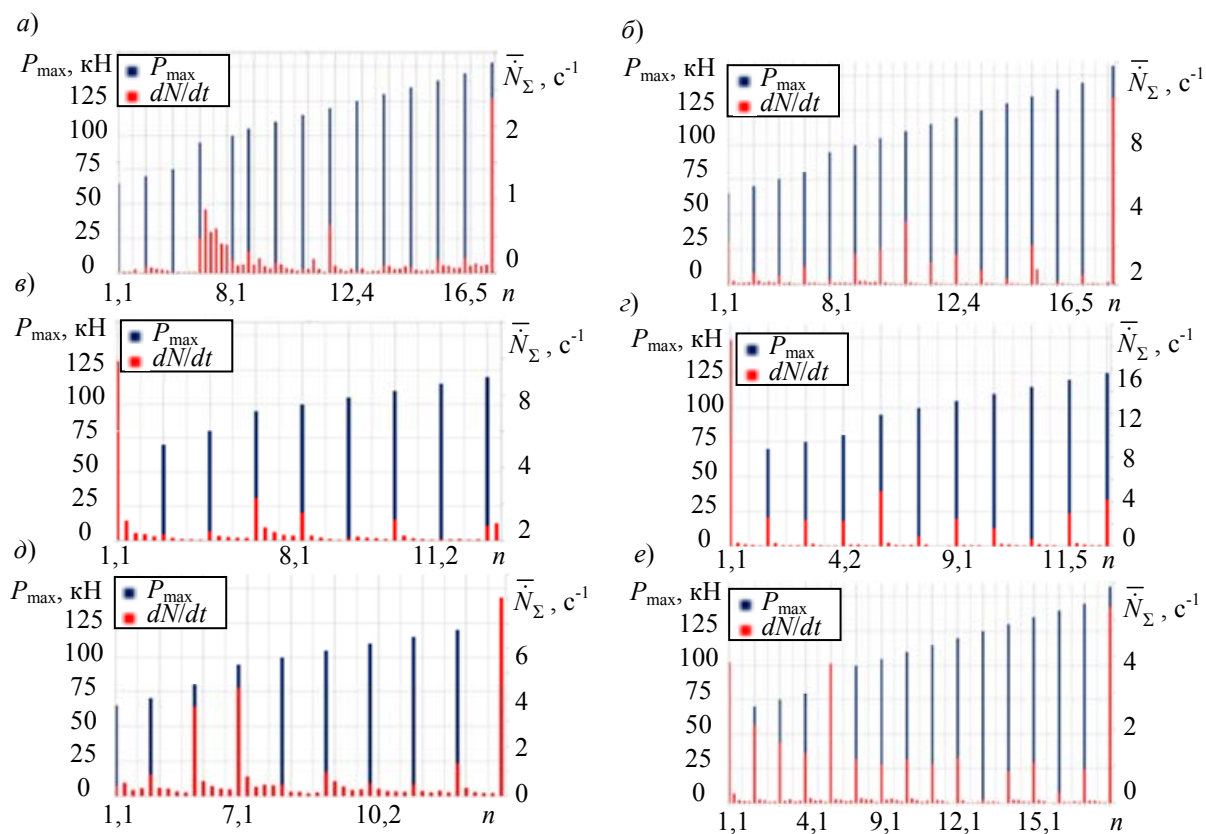


Рис. 5

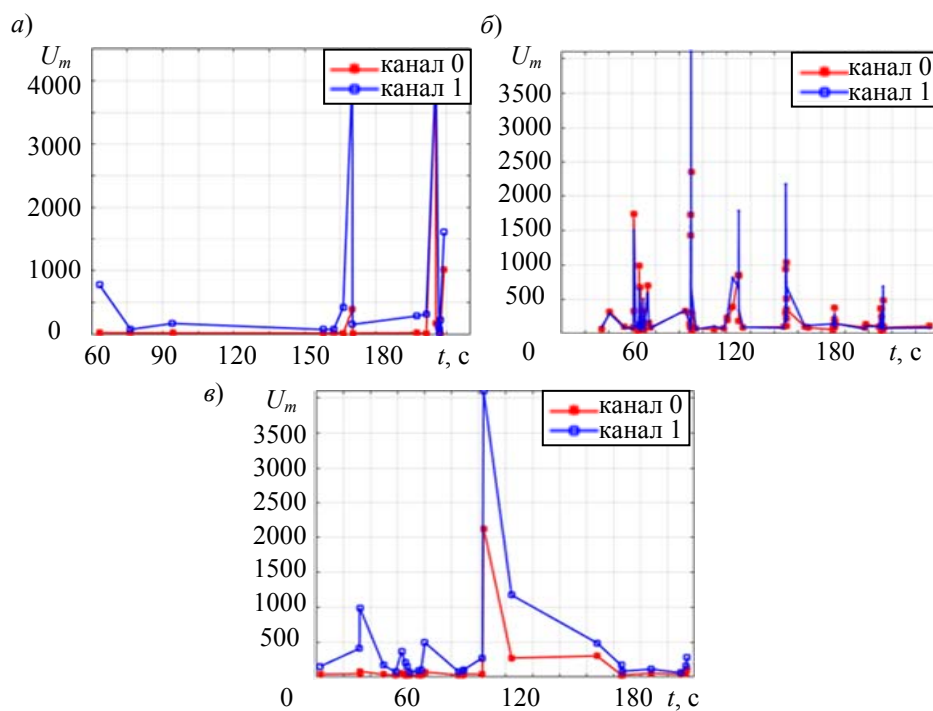


Рис. 6

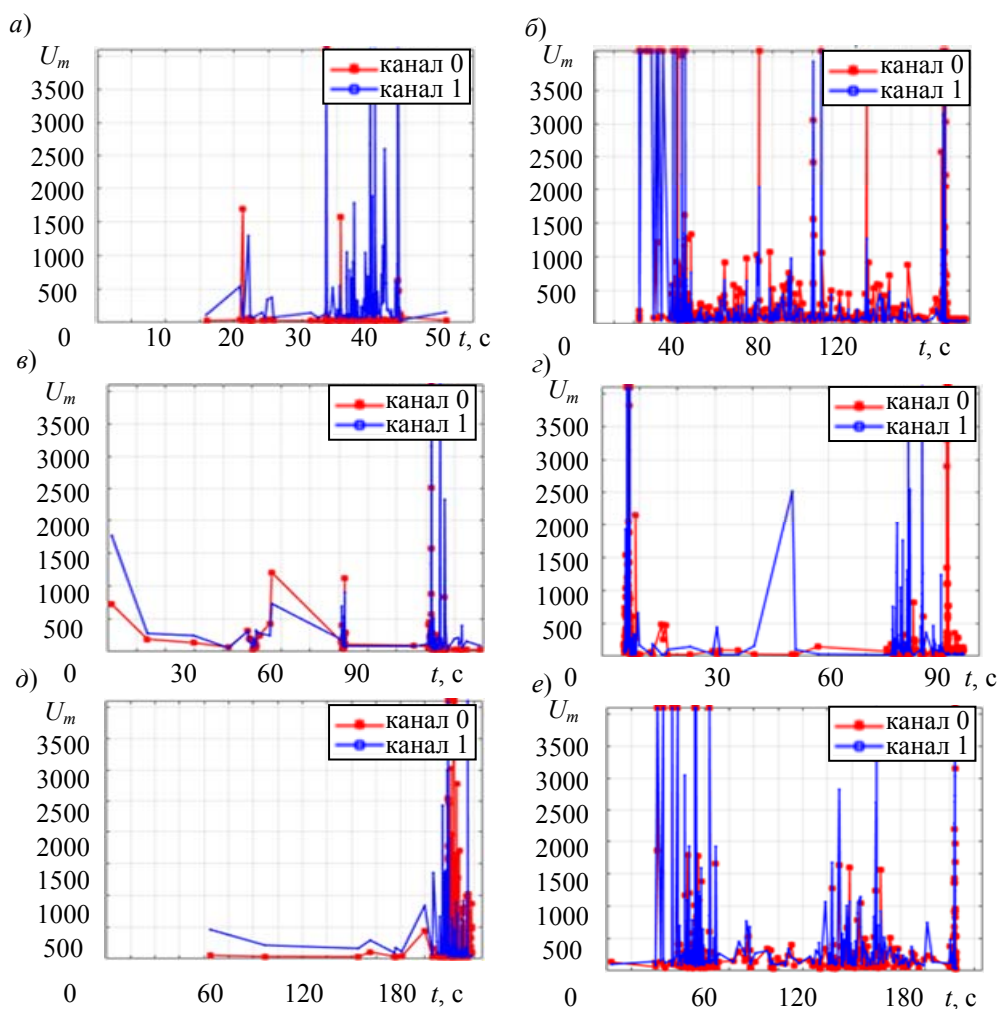


Рис. 7

В ходе исследования форм АЭ-сигналов, сопровождающих процесс разрушения образцов, с имитацией дефектов и без дефектов, выявлены характерные особенности амплитуды U_m сигналов (см. рис. 7).

Для АЭ-импульсов, локализованных в области накопления концентрации напряжений в рабочей части образца, характерно снижения длительности переднего фронта Δt .

Выводы. В ходе экспериментальных исследований образцов была обнаружена зависимость изменения параметров АЭ при контроле дефектных и бездефектных образцов.

Наиболее информативными параметрами АЭ в ходе эксперимента являлись число импульсов АЭ N_Σ , разность времени поступления сигнала АЭ, амплитуда сигналов АЭ U_m , активность АЭ $\dot{N}_\Sigma$.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что основным механизмом пластической деформации на этапах нагружения с превышением значения напряжений в цикле предела текучести материала $\sigma_{0,2}$ являются процессы скольжения на границах „кластеров“, образованных при спекании гранул жаропрочного сплава (размером $\approx 30\text{—}40$ мкм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kruth J.-P., Leu M. C., Nakagawa T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 1998. Vol. 47, N 2. P. 525—540. DOI:10.1016/S0007-8506(07)63240-5.
2. Berman B. 3-D Printing: The New Industrial Revolution // Business Horizons. 2012. Vol. 55, N 2. P. 155—162. DOI: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.

3. Гончарова О. Н., Бережной Ю. М., Бессарабов Е. Н., Кадамов Е. А., Гайнутдинов Т. М., Негопетьян Е. М., Ковина В. М. Аддитивные технологии — динамично развивающееся производство // Электронный научный журнал „Инженерный вестник Дона“. 2016. № 4 [Электронный ресурс]: <ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931>.
4. Khajavi S. H., Partanen J., Holmström J. Additive Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain // Computers in Industry. 2014. Vol. 65, N 1. P. 50—63. DOI:10.1108/RPJ-03-2017-0052.
5. Song B., Zhao X., Li Sh., Han Ch., Wei Q., Wen Sh., Liu J., Shi Yu. Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: a review // Frontiers of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 10, N 2. P. 111—125. DOI: 10.1007/s11465-015-0341-2.
6. Olakanmi E. O., Cochrane R. F., Dalgarno K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminum alloy powders: processing, microstructure, and properties // Progress in Materials Science. 2015. Vol. 74. P. 401—477. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.03.002.
7. Collins P. C., Haden C. V., Ghamarian I., Hayes B. J., Ales T., Penso G., Dixit V., Harlow G. Progress toward an integration of process-structure-property performance models for ‘three-dimensional (3-D) printing’ of titanium alloys // JOM. 2014. Vol. 66, N 7. P. 1299—1309. DOI:10.1007/s11837-014-1007-y.
8. Степанова Л. Н., Пестов Н. М., Чаплыгин В. Н., Кабанов С. И., Кожемякин В. Л., Лебедев Е. Ю., Катарушкин С. А. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов из авиаматериалов и элементов авиационных конструкций // Контроль. Диагностика. 2002. № 2. С. 19—24.
9. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кареев А. Е., Кожемякин В. Л., Лебедев Е. Ю., Кабанов С. И., Чаплыгин В. Н., Катарушкин С. А. Расчет остаточного ресурса образцов из авиаматериалов при их акустико-эмиссионном контроле // Контроль. Диагностика. 2002. № 9. С. 13—18.
10. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Митрофанов О. В., Куликов Е. Н., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю., Чаплыгин В. Н., Катарушкин С. А. Циклические испытания панелей самолета RRJ с использованием метода акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2007. № 7. С. 56—60.
11. Анасов А. М. Исследование сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении плоских образцов из высокопрочной стали // Изв. Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 2. С. 32—41.
12. Васильев Е. В., Виноградов А. Ю., Мерсон Д. Л., Брилевский А. И. Акустическая эмиссия при циклической деформации магниевого сплава ZK30 // Сборник материалов всероссийской конференции с международным участием „Актуальные проблемы метода акустической эмиссии“. Тольятти, 2018. С. 76.

Сведения об авторах

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Анастасия Сергеевна Ковалевич | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kovalevi4.a.s@gmail.com |
| Игорь Юрьевич Кинжагулов | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; преподаватель; E-mail: kinzhiki@mail.ru |
| Ксения Андреевна Степанова | — канд. техн. наук; Научно-технический центр „Эталон“, отдел научно-технических разработок; ведущий научный сотрудник; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru |
| Дмитрий Олегович Кузиванов | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com |

Поступила в редакцию 22.08.22; одобрена после рецензирования 07.09.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Kruth J.-P., Leu M.C., Nakagawa T. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1998, no. 2(47), pp. 525–540, DOI:10.1016/S0007-8506(07)63240-5.
2. Berman B. *Business Horizons*, 2012, no. 2(55), pp. 155–162, DOI: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
3. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931. (in Russ.)
4. Khajavi S.H., Partanen J., Holmström J. *Computers in Industry*, 2014, no. 1(65), pp. 50–63, DOI:10.1108/RPJ-03-2017-0052.
5. Song B., Zhao X., Li Sh., Han Ch., Wei Q., Wen Sh., Liu J., Shi Yu. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2015, no. 2(10), pp. 111–125, DOI: 10.1007/s11465-015-0341-2.
6. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. *Progress in Materials Science*, 2015, vol. 74, pp. 401–477, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.03.002.
7. Collins P.C., Haden C.V., Ghamarian I., Hayes B.J., Ales T., Penso G., Dixit V., Harlow G. *JOM*, 2014, no. 7(66), pp. 1299–1309, DOI:10.1007/s11837-014-1007-y.

8. Stepanova L.N., Pestov N.M., Chaplygin V.N., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., Lebedev E.Yu., Katarushkin S.A. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2002, no. 2, pp. 19–24. (in Russ.)
9. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Kareev A.E., Kozhemyakin V.L., Lebedev E.Yu., Kabanov S.I., Chaplygin V.N., Katarushkin S.A. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2002, no. 9, pp. 13–18. (in Russ.)
10. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Mitrofanov O.V., Kulikov E.N., Kabanov S.I., Lebedev E.Yu., Chaplygin V.N., Katarushkin S.A. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2007, no. 7, pp. 56–60. (in Russ.)
11. Apasov A.M. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2010, no. 2(316), pp. 32–41. (in Russ.)
12. Vasiliev E.V., Vinogradov A.Yu., Merson D.L., Brilevsky A.I. *Aktual'nyye problemy metoda akusticheskoy emissii* (Actual Problems of the Acoustic Emission Method), Collection of Materials of the All-Russian Conference with International Participation, Tolyatti, 2018, pp. 76. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|---------------------------------|---|--|
| Anastasiia S. Kovalevich | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kovalevi4.a.s@gmail.com |
| Igor Yu. Kinzhagulov | — | PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; преподаватель; E-mail: kinzhiki@mail.ru |
| Kseniya A. Stepanova | — | PhD; Scientific and Technical Center Etalon, Department of Scientific and Technical Development; Leading Researcher; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru |
| Dmitry O. Kuzivanov | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com |

Received 22.08.22; approved after reviewing 07.09.22; accepted for publication 27.12.22.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА С ОПТОВОЛОКОННЫМ ЗОНДОМ
ДЛЯ ОЦЕНКИ МИНИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ КЛЕТОК
ПО СПЕКТРАМ ДИФFUЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ

Е. С. Бойченко^{1*}, А. В. Панченко², А. А. Суркова³, Д. О. Кирсанов⁴

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*ekaterina.boichenko@inbox.ru

² Научно-исследовательский институт медицинской приматологии,
Краснодарский край, Сочи, Россия

³ Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Цель исследования — разработка методики оценки минимального числа злокачественных клеток, распознаваемых по их спектрам диффузного отражения, полученным в ближней инфракрасной области (БИК) посредством компактной спектрометрической аппаратуры. В ходе исследования подготовлена культура клеток рака яичников для подкожного введения лабораторным мышам, для создания калибровочной шкалы приготовлены растворы с различной концентрацией таких клеток. Измерение БИК-спектров проводилось на живых лабораторных мышах (в заранее отмеченных точках) под анестезией до прокола и после введения клеточной культуры. Выявлены спектральные характеристики, чувствительные к изменению числа клеток в точке измерения (интенсивность пика, сдвиг базовой линии), и оценено минимальное надежно распознаваемое число клеток злокачественных опухолей по графику зависимости величины поглощения на длине волны 1200 нм от логарифма числа клеток в растворе.

Ключевые слова: оптоволоконный зонд, оптическая спектроскопия, злокачественные клетки, онкология, ближняя инфракрасная область

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ №МК-2192.2021.4. Авторы благодарят к.х.н. М. М. Хайдукову за ценные комментарии о работе.

Ссылка для цитирования: Бойченко Е. С., Панченко А. В., Суркова А. А., Кирсанов Д. О. Применение спектрометра с оптоволоконным зондом для оценки минимального числа злокачественных клеток по спектрам диффузного отражения в ближней инфракрасной области // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 148—154. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-148-154.

USE OF A FIBER OPTIC SPECTROMETER TO ASSESS THE MINIMUM NUMBER OF MALIGNANT CELLS
BY DIFFUSE REFLECTANCE SPECTRA IN THE NEAR INFRARED REGION

E. S. Boichenko^{1*}, A. V. Panchenko², A. A. Surkova³, D. O. Kirsanov⁴

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

*ekaterina.boichenko@inbox.ru

² Research Institute of Medical Primatology,
Krasnodar Region, Sochi, Russia

³ Samara State Technical University, Samara, Russia

⁴ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The aim of the study was to develop a technique for assessing the minimum number of malignant cells recognizable by their diffuse reflectance spectra obtained in the near infrared region (NIR) using compact spectrometric

equipment. In the course of the study, a culture of ovarian cancer cells was prepared for subcutaneous injection into laboratory mice; solutions with various concentrations of such cells were prepared to create a calibration scale. Measurement of NIR spectra was carried out on live laboratory mice (at pre-marked points) under anesthesia before puncture and after the introduction of cell culture. Spectral characteristics that are sensitive to changes in the number of cells at the measurement point (peak intensity, baseline shift) have been identified, and the minimum reliably recognizable number of malignant tumor cells has been estimated from the graph of the dependence of the absorption value at a wavelength of 1200 nm on the logarithm of the number of cells in solution.

Keywords: fiber optic probe, optical spectroscopy, malignant cells, oncology, near infrared region

Acknowledgments: The study was supported by a grant from the President of the Russian Federation No. MK-2192.2021.4. The authors thank PhD M. M. Khaidukova for valuable comments on the work.

For citation: Boichenko E. S., Panchenko A. V., Surkova A. A., Kirsanov D. O. Use of a fiber optic spectrometer to assess the minimum number of malignant cells by diffuse reflectance spectra in the near infrared region. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 148—154 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-148-154.

Введение. Бурное развитие технологий приборостроения в последние десятилетия позволило перейти на новый уровень диагностики и хирургического лечения онкологических заболеваний. Многие технологии, ранее казавшиеся недоступными, теперь широко применяются в клиниках всего мира: малоинвазивные операции с использованием роботизированных систем, радиохирurgia, позволяющая удалять опухоли головного мозга без разрезов и др. Тем не менее, для хирургического лечения опухолей до сих пор требуются серьезные технологические разработки, в частности, приборы для эффективного определения границ опухоли в ходе операции на микроскопическом уровне. В настоящее время границы опухоли устанавливаются либо визуально, либо с помощью гистологического исследования методом окрашивания тканей. Такая оценка требует привлечения квалифицированных специалистов и использования соответствующего оборудования [1]. Кроме того, эти методы не позволяют получать информацию о составе ткани в режиме реального времени, что значительно увеличивает продолжительность хирургического вмешательства или долю повторных операций, если постоперационное исследование покажет наличие опухолевых клеток в срезе ткани [2].

В последние годы активно развивается исследовательское направление, посвященное применению различных видов оптической спектроскопии в области диагностики и лечения злокачественных опухолей [3—5]. В частности, применение оптоволоконных технологий позволяет непосредственно во время хирургического вмешательства проводить неразрушающий спектральный анализ для установления точных границ опухоли [6]. Использование выносных зондов дает возможность проводить исследование непосредственно на пациенте, без взятия образцов тканей. Коммерческая доступность гибких оптоволоконных зондов разного диаметра и длины позволяет интегрировать их в существующие хирургические инструменты, в том числе для малоинвазивных операций [7, 8]. В работе Амири и др. [9] предпринята успешная попытка интегрировать оптоволоконный зонд в электрохирургический нож, авторы также изучили эффект ухудшения сигнала и изменения морфологии поверхности волокон, вызванный проведением электрохирургии. В работе Биджио и др. были представлены две конструкции оптоволоконного зонда [10]; первый зонд был внедрен в стандартные иглы для биопсии рака молочной железы, а второй разработан для открытой хирургии молочной железы. Для обеспечения хирургической асептики были также предложены процедуры дезинфекции зондов [11].

Одними из основных характеристик оптоволоконных зондов являются длина кабеля, диаметр зонда, количество волокон и их расположение. Однако на этапе создания измерительной установки необходимо принять во внимание и существующие клинические рекомендации. Например, при удалении опухоли молочной железы необходимо обеспечить отсутствие злокачественных клеток на расстоянии 2 мм от края резекции [2]. Таким образом, для корректного описания возможностей методики и последующего конструирования прибора необходимо оценить, какое минимальное число злокачественных клеток может быть надежно

распознано в ткани по их спектральным сигналам. Это позволит не только дать понимание о пределах применимости методики в клинической практике, но и сравнивать ее с другими разрабатываемыми методиками.

Такие эксперименты рекомендуется проводить *in vivo* (на человеке или животных моделях) для получения более реалистичной оценки в условиях, приближенных к реальному использованию методики. Поскольку биологические ткани представляют собой сложные клеточные структуры, использование стандартных образцов или модельных смесей *in vitro* (вне живого организма) для оценки минимального распознаваемого числа клеток затруднено или вовсе неприменимо.

Целью настоящей работы являлось создание методики оценки минимального числа опухолевых клеток, распознаваемых по их спектрам диффузного отражения, полученным в ближней инфракрасной области (БИК) посредством компактной спектрометрической аппаратуры. Тестирование методики проведено на животной модели рака яичников.

Материалы и методы. Эксперимент проводили на пяти здоровых самках мышей линии BALB/c. С кожи спины животных предварительно удаляли шерсть. Перед началом эксперимента каждая мышь получала анестезию. В процессе манипуляций мышам подкожно вводили растворы, содержащие клетки рака яичника. Число клеток в первом растворе было определено методом подсчета в камере Горяева, далее выполняли поэтапное разведение раствора физиологическим раствором (0,9% NaCl). Всего было приготовлено девять растворов с различным числом клеток (см. таблицу). Каждый раствор вводили пять раз в различные точки на спине мыши. На одну особь приходилось по два раствора. В качестве нулевого образца вводился чистый физиологический раствор (0,9% NaCl).

Содержание клеток рака яичника
в инъекционных растворах

Номер раствора	Число клеток, ед.
1	50000
2	25000
3	12500
4	5000
5	2500
6	500
7	200
8	100
9	50

Установка для получения спектров в БИК-области состояла из портативного спектрометра AvaSpec-NIR256-1.7-USB2 (Avantes, Нидерланды), оснащенного гибким оптоволоконным зондом (Artphotronics, Германия) диаметром 3 мм и галогеновой лампой в качестве источника света (MobiLight SN LABPOD-1624—1506). В состав спектрометра входили симметричный монохроматор Черни—Тернера и линейный детектор на основе арсенида индия-галлия (256 пикселей). Оптоволоконный зонд состоял из нескольких волокон, передающих излучение от источника к образцу, и центрального волокна, проводящего отраженный свет от поверхности образца к детектору.

На рис. 1, а представлена схема измерительной установки для регистрации спектров в режиме диффузного отражения в БИК; б — схема расположения точек инъекции на спине мыши (на первом этапе спектр регистрировали в точке до инъекции, на втором — после инъекции). Двумя цветами обозначены растворы с разным числом клеток).

Изучаемый спектральный диапазон составил от 938 до 1799 нм при шаге в 4 нм. Спектры были получены в режиме диффузного отражения: этот режим подходит для неоднородной поверхности кожи животного, а также обеспечивает проникновение излучения на глубину около 1—2 мм, что соответствует толщине подкожной папулы (локальное уплотнение небольшого размера, вызванное местным повреждением нижних слоев кожи в результате

инъекции). Один спектр записывался в течение 56 мс, после чего девять последовательно сохраненных в памяти программного обеспечения спектров автоматически усреднялись и сохранялись как результат одного измерения. Время регистрации спектров выбрано посредством функции автоматической оптимизации в программном обеспечении AvaSoft 7.8.

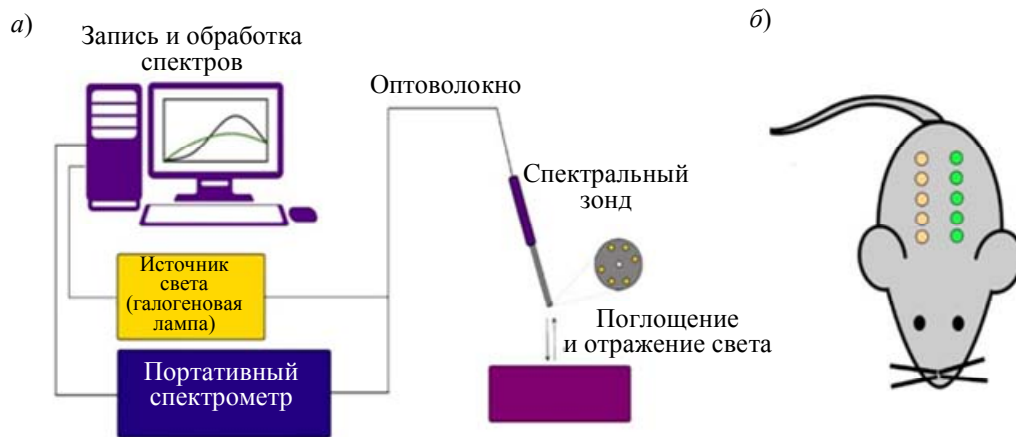


Рис. 1

Для регистрации спектра сравнения использовали фторопластовый стандартный образец (Spectralon, labsphere, Inc., North Sutton, США), темновой спектр регистрировали при выключенном источнике излучения. Данные спектры далее использовались для вычисления величины поглощения A на длине волны λ по формуле:

$$A_{\lambda} = -\log \left(\frac{\text{sample}_{\lambda} - \text{dark}_{\lambda}}{\text{reference}_{\lambda} - \text{dark}_{\lambda}} \right),$$

где *sample* — величина сигнала образца, *dark* — темнового фона, *reference* — стандартная величина сигнала. Величины поглощения A_{λ} далее использовались при сохранении спектров, обработке данных и их графическом представлении.

На первом этапе регистрировали спектр кожи лабораторного животного в месте, намеченном для инъекции. Зонд плотно прижимали к коже и фиксировали вручную. Далее проводили инъекцию раствора и получали спектр папулы, образовавшейся после инъекции. Полученные данные усредняли по пяти повторениям для одного раствора и обрабатывали в программе Origin 2017.

Результаты и обсуждение. На рис. 2 представлены разностные БИК-спектры кожи мышей до и после инъекции (усредненный спектр кожи до инъекции вычитался из усредненных спектров кожи после инъекции для каждого раствора). Пунктиром показан спектр папулы после инъекции чистого физиологического раствора (0,9% NaCl). Предобработка спектральных данных заключалась в удалении исходной базовой линии путем вычитания из каждого отдельного спектра минимальной величины поглощения в нем. Первый пик при 1200 нм соответствует второму обертому колебаний связи С-Н и может быть ассоциирован с содержанием липидов в клетках. Второй пик при 1455 нм, главным образом связанный с содержанием воды, соответствует первому обертому колебаний О-Н, N-H и С-Н [3].

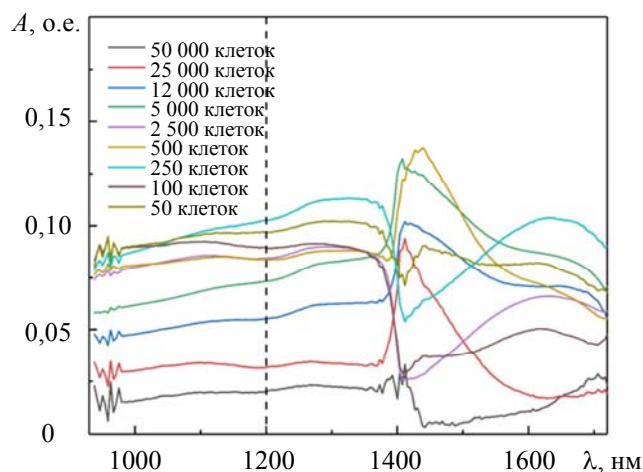


Рис. 2

Для изучения корреляции между величиной поглощения на длине волны 1200 нм в разностном спектре и числом клеток в инъекционном растворе был построен график полулогарифмической зависимости (рис. 3) и проведена линейная аппроксимация двух его участков методом наименьших квадратов. По графику можно отметить, что корреляция при числе клеток порядка 10^1 — 10^2 выражена слабо (коэффициент корреляции $r^2 = 0,20$, уравнение линейной регрессии, рассчитанное в Origin, — $y = 0,11 - 0,08x$). Начиная с раствора с числом клеток 2500 зависимость величины поглощения на длине волны 1200 нм и $\lg(N)$, где N — число клеток в растворе, приобретает выраженный линейный характер (коэффициент корреляции $r^2 = 0,99$, уравнение линейной регрессии, рассчитанное в Origin, $y = 0,26 - 0,05x$). Таким образом, минимально распознаваемое число опухолевых клеток для используемой измерительной установки оценивается как 3200 (значение получено пересечением двух прямых). Если принять за средние линейные размеры опухолевой клетки 15×15 мкм [12], то в первом приближении минимально распознаваемое число клеток соответствует опухоли площадью $0,7 \text{ мм}^2$.

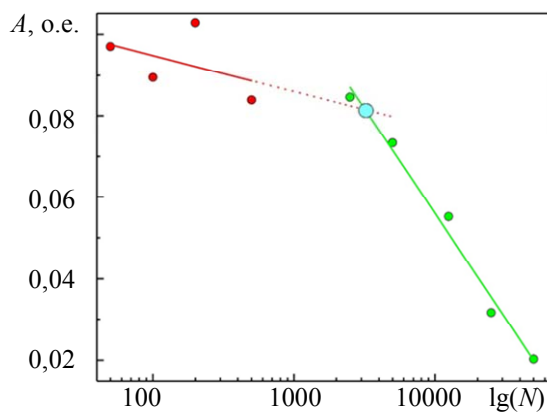


Рис. 3

Заключение. В настоящей работе продемонстрирована методика оценки минимального числа опухолевых клеток, надежно распознаваемых по их спектрам, полученным в ближней инфракрасной области с помощью компактного спектрометра с оптоволоконным зондом. Использование разработанной методики продемонстрировано на лабораторных животных *in vivo*.

Методика в режиме реального времени позволяет для конкретного прототипа спектрометрической аппаратуры оценить обеспечение чувствительности, достаточной для определения границ опухолей в ходе операции согласно клиническим рекомендациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jaafar H.* Intra-operative frozen section consultation: concepts, applications and limitations // *The Malaysian Journal of Medical Sciences*. 2006. Vol. 13, N 1. P. 4.
2. *Brown J. Q.* et al. Optical assessment of tumor resection margins in the breast // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2009. Vol. 16, N 3. P. 530—544.
3. *Kondepati V. R., Heise H. M., Backhaus J.* Recent applications of near-infrared spectroscopy in cancer diagnosis and therapy // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2008. Vol. 390, N 1. P. 125—139.
4. *Oleneva E.* et al. In vivo and in vitro application of near-infrared fiber optic probe for Ehrlich carcinoma distinction: Towards the development of real-time tumor margins assessment tool // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2019. Vol. 213. P. 12—18.
5. *Evers D. J.* et al. Optical spectroscopy: current advances and future applications in cancer diagnostics and therapy // *Future Oncology*. 2012. Vol. 8, N 3. P. 307—320.
6. *Mackanos M. A., Contag C. H.* Fiber-optic probes enable cancer detection with FTIR spectroscopy // *Trends in Biotechnology*. 2010. Vol. 28, N 6. P. 317—323.
7. *Canpolat M.* et al. Intra-operative brain tumor detection using elastic light single-scattering spectroscopy: a feasibility study // *Journal of Biomedical Optics*. 2009. Vol. 14, N 5. P. 054021.
8. *De Boer L. L.* et al. Towards the use of diffuse reflectance spectroscopy for real-time in vivo detection of breast cancer during surgery // *Journal of Translational Medicine*. 2018. Vol. 16, N 1. P. 1—14.
9. *Amiri S. A.* et al. Intraoperative tumor margin assessment using diffuse reflectance spectroscopy: the effect of electrosurgery on tissue discrimination using ex vivo animal tissue models // *Biomedical Optics Express*. 2020. Vol. 11, N 5. P. 2402—2415.
10. *Bigio I. J.* et al. Diagnosis of breast cancer using elastic-scattering spectroscopy: preliminary clinical results // *Journal of Biomedical Optics*. 2000. Vol. 5, N 2. P. 221—228.
11. *Ollesch J.* et al. Clinical application of infrared fibre-optic probes for the discrimination of colorectal cancer tissues and cancer grades // *Vibrational Spectroscopy*. 2017. Vol. 91. P. 99—110.
12. *Shashni B.* et al. Size-based differentiation of cancer and normal cells by a particle size analyzer assisted by a cell-recognition PC software // *Biological and Pharmaceutical Bulletin*. 2018. Vol. 41, N 4. P. 487—503.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Екатерина Сергеевна Бойченко | — Университет ИТМО; инженер-исследователь;
E-mail: ekaterina.boichenko@inbox.ru |
| Андрей Владимирович Панченко | — д-р мед. наук; Научно-исследовательский институт медицинской приматологии; главный научный сотрудник;
E-mail: ando_pan@mail.ru |
| Анастасия Алексеевна Суркова | — канд. хим. наук; Самарский государственный технический университет; научный сотрудник; E-mail: melenteva-anastasija@rambler.ru |
| Дмитрий Олегович Кирсанов | — д-р хим. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет; E-mail: d.kirsanov@gmail.com |

Поступила в редакцию 30.08.22; одобрена после рецензирования 21.11.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. *Jaafar H.* *The Malaysian Journal of Medical Sciences*, 2006, no. 1(13), pp. 4.
2. *Brown J.Q.* et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, no. 3(16), pp. 530—544.
3. *Kondepati V.R., Heise H.M., Backhaus J.* *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, no. 1(390), pp. 125—139.
4. *Oleneva E.* et al. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, vol. 213, pp. 12—18.
5. *Evers D.J.* et al. *Future Oncology*, 2012, no. 3(8), pp. 307—320.
6. *Mackanos M.A., Contag C.H.* *Trends in Biotechnology*, 2010, no. 6(28), pp. 317—323.
7. *Canpolat M.* et al. *Journal of Biomedical Optics*, 2009, no. 5(14), pp. 054021.
8. *De Boer L.L.* et al. *Journal of Translational Medicine*, 2018, no. 1(16), pp. 1—14.
9. *Amiri S.A.* et al. *Biomedical Optics Express*, 2020, no. 5(11), pp. 2402—2415.
10. *Bigio I.J.* et al. *Journal of Biomedical Optics*, 2000, no. 2(5), pp. 221—228.
11. *Ollesch J.* et al. *Vibrational Spectroscopy*, 2017, vol. 91, pp. 99—110.
12. *Shashni B.* et al. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 2018, no. 4(41), pp. 487—503.

Data on authors

- Ekaterina S. Boichenko** — ITMO University; Research Engineer; E-mail: ekaterina.boichenko@inbox.ru
Andrey V. Panchenko — Dr. Sci.; Research Institute of Medical Primatology; Chief Researcher;
E-mail: ando_pan@mail.ru
Anastasia A. Surkova — PhD; Samara State Technical University; Researcher;
E-mail: melenteva-anastasija@rambler.ru
Dmitry O. Kirsanov — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State University;
E-mail: d.kirsanov@gmail.com

Received 30.08.22; approved after reviewing 21.11.22; accepted for publication 27.12.22.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д. Д. Куликов*, Е. И. Яблочников, А. В. Чукичев, О. А. Абышев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
* ddkulikov@mail.ru

Аннотация. Сложность интеграции систем автоматизированного проектирования, в частности CAD, и системы автоматизированного проектирования технологических процессов вызвана отсутствием между ними необходимой интероперабельности. Предложен метод параллельного формирования геометрической и параметрической модели детали, позволяющий обеспечить необходимую совместимость моделей. Метод основан на создании библиотеки параметрических моделей конструктивных элементов. Настройка элемента путем вывода параметров на экран автоматически приводит к настройке его геометрического образа с последующим присоединением к формирующемуся образу детали. Метод требует создания соответствующих библиотек конструктивных элементов и организации единого информационного пространства технологической подготовки производства. Предложенный метод сокращает время конструирования деталей и проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: САПР технологических процессов, единое информационное пространство, геометрическая модель детали, параметрическая модель детали, интероперабельность, технологическая подготовка производства

Ссылка для цитирования: Куликов Д. Д., Яблочников Е. И., Чукичев А. В., Абышев О. А. Методика формирования параметрических моделей деталей для автоматизированного проектирования технологических процессов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 155—161. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-155-161.

METHODOLOGY FOR CREATING PARAMETRIC MODELS OF PARTS
FOR AUTOMATED DESIGN
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

D. D. Kulikov*, E. I. Yablochnikov, A. V. Chukichev, O. A. Aбышев

ITMO University, St. Petersburg, Russia
* ddkulikov@mail.ru

Abstract. The complexity of integrating computer-aided design systems, in particular AutoCAD, and computer-aided design of technological processes is caused by the lack of the necessary interoperability between them. A method of parallel formation of the geometric and parametric model of a part is proposed, which makes it possible to ensure the necessary compatibility of models. The method is based on the creation of a library of parametric models of structural elements. Setting the element by displaying the parameters on the screen automatically leads to the setting of its geometric image with subsequent attachment to the forming image of the part. The method requires the creation of appropriate libraries of structural elements and the organization of a single information space for technological preparation of production. The proposed method reduces the time for designing parts and developing technological processes.

Keywords: computer-aided process planning system, unified information space, geometric model of part, parametric model of part, interoperability, technological preparation of production

For citation: Kulikov D. D., Yablochnikov E. I., Chukichev A. V., Abyshv O. A. Methodology for creating parametric models of parts for automated design of technological processes. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 2. P. 155—161 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-155-161.

Введение. Проектирование технологических процессов (ТП) является важной составной частью подготовки производства изделий машиностроения и приборостроения. В настоящее время в стране активно используются системы автоматизированного проектирования (САПР) как деталей (CAD-системы), так и технологических процессов. В 1970-х гг. в СССР были разработаны системы параметрического моделирования деталей (ПМД) с последующим автоматическим проектированием ТП на их основе [1—3]. Однако активное развитие CAD-систем, удобных для создания чертежей деталей и сборок и основанных на создании геометрических моделей деталей (ГМД), привело к отторжению САПР ТП, использующих ПМД. Современные тенденции, направленные на переход к цифровому производству, к интеграции систем конструкторской и технологической подготовки требуют проведения исследований по преодолению барьера интероперабельности (несовместимости) между этими типами систем. Данный барьер приводит к необходимости трудоемкого переноса технологической информации из ГМД в параметрическую модель ТП, формируемую в САПР ТП.

В настоящее время разработан комплекс стандартов [4, 5]*, определяющих виды и уровни интероперабельности, необходимые при интеграции информационных систем, которые целесообразно использовать для оценки рассматриваемой ситуации. Важность и необходимость интеграции CAD и САПР ТП для ликвидации барьера интероперабельности показана в работе [6, 7].

Метод параллельного формирования параметрической модели детали. Для ликвидации барьера интероперабельности в работе [8] предложен метод параллельного формирования ПМД, основанный на одновременном построении параметрической и геометрической модели детали. Этот метод включает следующие этапы.

1. Создается библиотека конструктивных элементов (КЭ), из которых может формироваться необходимая конструктору деталь. Каждый КЭ состоит из нескольких частей: геометрическая модель элемента в терминах выбранной CAD-системы; комплекс макросов для вывода на экран таблиц с целью заполнения параметрами элемента (размеры, точность, шероховатость, отклонения формы и т.д.); макрос для настройки геометрической модели элемента на введенные параметры; макрос для создания его параметрической модели в формате XML на основе введенных для элемента значений параметров.

2. После заполнения таблицы с параметрами элемента появляется возможность вывести на экран 3D-изображение элемента, настроенного на введенные параметры.

3. Соединяя созданные 3D-изображения элементов с помощью операций булевой алгебры, конструктор получает твердотельную геометрическую модель детали с полным набором атрибутов. Одновременно получается и ее параметрическая модель в формате JSON [9], с которой в дальнейшем возможно оперировать системой управления базами данных (СУБД).

4. Полученная электронная геометрическая модель (назовем ее моделью типа I, или исходной) должна быть приведена к виду, привычному для конструкторов, путем удаления обозначений номеров элементов и обозначений параметров. Для этого используется специальная процедура. В результате получается конструкторская модель детали, или модель типа II. Эта модель не рассматривается в настоящей работе, так как для проектирования ТП нужна исходная ГМД.

Данный метод обладает следующими достоинствами:

* ГОСТ Р ИСО 11354-1-2012. Усовершенствованные автоматизированные технологии и их применение. Требования к установлению интероперабельности процессов промышленных предприятий. Ч. 1. Основа интероперабельности предприятий. М.: Стандартинформ, 2014. 63 с.

1) дает возможность ускорить ввод информации о конструктивных элементах, так как не требует ввода геометрии элементов, а позволяет лишь выбирать элемент из библиотеки элементов и далее выполнять лишь ввод атрибутов этого элемента. Макрос, разработанный для данного элемента, автоматически настраивает геометрическую модель элемента на введенные параметры;

2) дает возможность автоматически формировать параметрические модели элемента со всеми атрибутами параллельно с созданием геометрической модели;

3) обеспечивает автоматический перенос информации общего назначения в параметрическую модель детали;

4) на базе применения процедур работы с СУБД MongoDB [9] может быть выполнена выборка любой информации из ПМД и автоматически использована в процессе проектирования технологических процессов.

Предложенный метод позволил преодолеть барьер интероперабельности между САД-системой и САПР ТП за счет одновременного создания как ГМД, так и ПМД. Для проверки указанной методики на базе САД-системы CATIAv5 была разработана экспериментальная система ТИС-Деталь [8]. Программирование пользовательских макросов выполнялось на внутреннем языке CATScript.

Концептуально ПМД представляет собой фреймовое иерархическое представление объекта. Слоты фрейма — это параметры, содержащие обозначение параметра, предикат и значение параметра. Как было указано выше, для хранения параметрических моделей деталей была выбрана документо-ориентированная СУБД MongoDB, которая оперирует с форматом JSON. В этом формате создаются коллекции данных, которые содержат документы, которые, в свою очередь, могут быть разделены на поддокументы. Документы (поддокументы) содержат поля, состоящие из наименования параметра и его значения (либо одиночного, либо в виде массива значений). Документы и поддокументы могут отличаться друг от друга составом параметров, что и позволяет хранить информацию об объектах с переменной структурой. Каждый КЭ имеет индивидуальный состав параметров, который может уточняться в зависимости от того, какие параметры были использованы для формирования модели элемента. Атрибуты параметров (концепт, обозначение, тип) хранятся в словарной системе. Эти атрибуты используются при проектировании ТП, для проверки согласованности при передаче информации о конструктивных элементах из одного функционального компонента в другой. Словарная система вместе с онтологией образуют единое информационное пространство для конструкторской и технологической подготовки производства. Таким образом, полученный уровень интероперабельности можно охарактеризовать как семантический, основанный на использовании единого информационного пространства.

Формирование моделей детали. Рассмотрим процесс конструирования детали. Информация о модели детали разделена на следующие части: общие характеристики, конструктивные элементы детали, связи между элементами.

Ввод данных осуществляется следующим образом. В первую очередь используется интерфейс для управления процессом ввода данных. Управляющий экран предоставляет возможность перехода к любой части модели детали, а также возможность вывода результатов формирования ГМД и ПМД. Сначала заполняются общие характеристики детали, как показано на рис. 1, а. Далее конструктор выбирает КЭ и вводит его параметры (см. рис. 1, б и в). После этого на экран выводится 3D-элемент вместе с его атрибутами, что выполняется значительно быстрее, по сравнению с тем, чтобы формировать ЭДМ обычным способом.

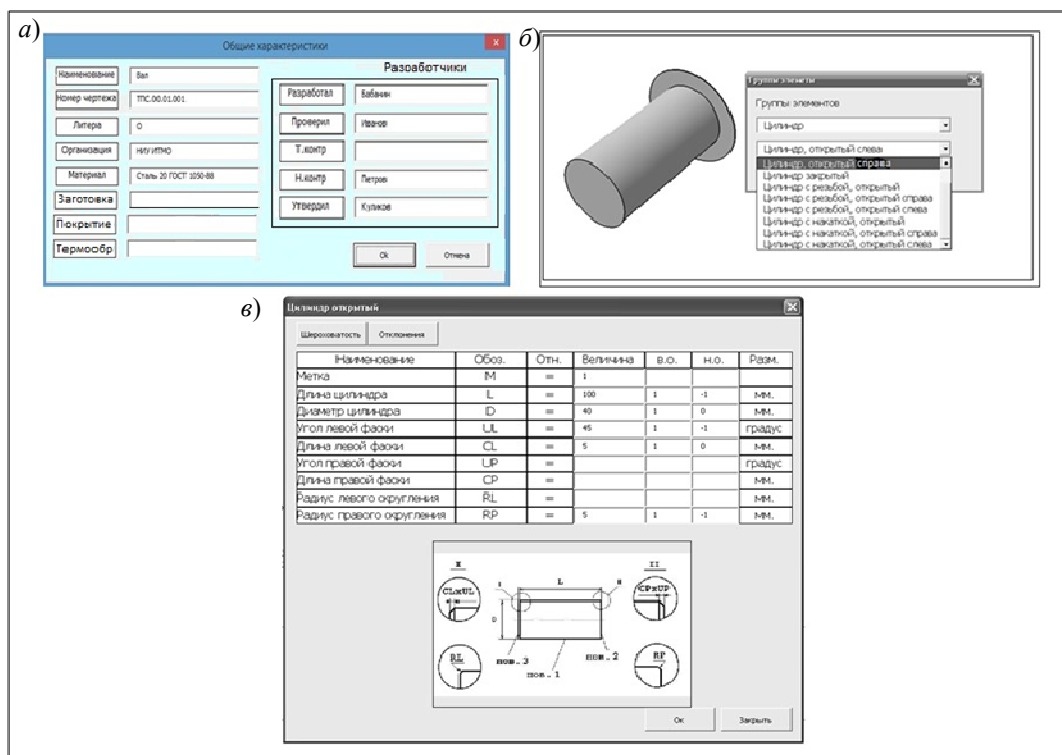


Рис. 1

Как видно из рис. 1, в, возможно вводить параметры КЭ с указанием их точности. Колонка „Собст.“ позволяет отметить, является ли данный размер собственным или несобственным размером КЭ. Собственный размер должен быть обязательно проставлен на геометрической модели элемента. Несобственный параметр не проставляется на чертеже детали, и его точность не контролируется при изготовлении детали.

На рис. 2 для элемента Э1 его параметр С является несобственным размером и будет присутствовать лишь в параметрической модели без указания точности. Кнопка „Шероховатость“ используется для вывода таблицы с указаниями параметров шероховатостей КЭ; „Отклонения“ — с целью вывода таблицы для задания допустимых параметров отклонения формы поверхностей КЭ; „XML“ — для просмотра параметрической модели КЭ в формате XML; „Покрытие“ и „Термообработка“ — для задания местного покрытия или местной термообработки.

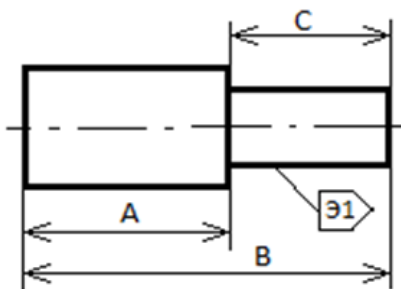


Рис. 2

Необходимо отметить, что обозначение параметра в чертеже детали обычно не проставляется, но оно нужно при решении технологических задач, возникающих при проектировании ТП, например, при выборе режущего и измерительного инструмента, при расчете выдерживаемых при обработке заготовки операционных размеров и т.д. Необходимо иметь возможность показа размеров КЭ без обозначения их параметров. Поэтому кнопка „Вид“ используется для вывода конфигурации элемента без простановки обозначений параметров, что позволяет оценить, насколько удачно выполнена простановка атрибутов элемента и не ме-

шают ли они друг другу. Для примера на рис. 3, а показан условный пример вывода КЭ с максимальным количеством заданных параметров, а на рис. 3, б — тот же элемент после нажатия кнопки „Вид“.

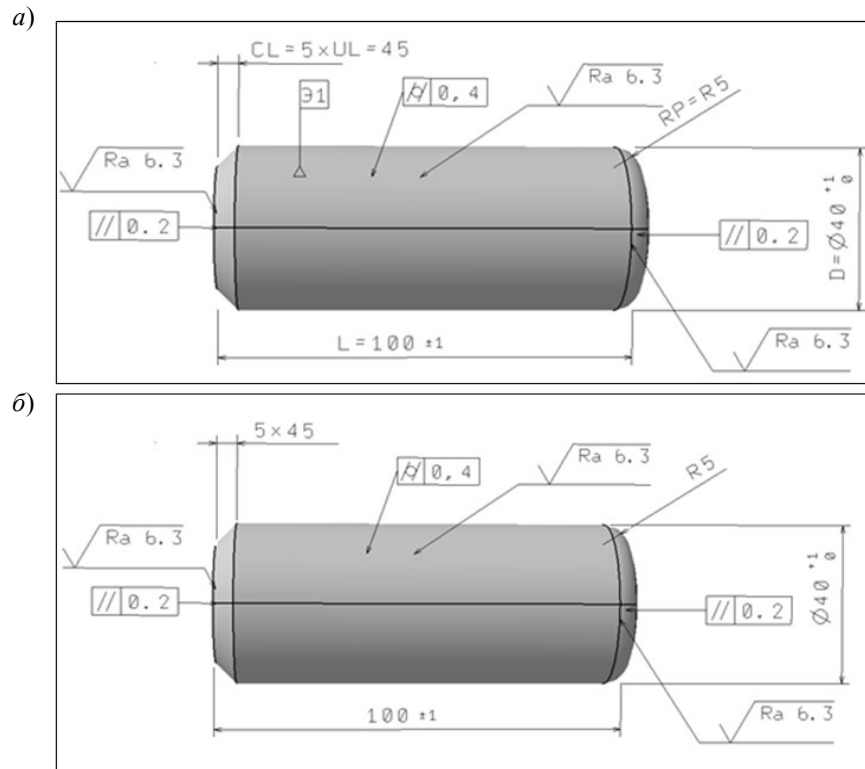


Рис. 3

Важной задачей является конструирование детали из сформированных КЭ. Эта задача может решаться двумя способами. Первый основан на присоединении вновь созданного КЭ к уже сформированной части детали. Второй способ заключается в получении множества необходимых КЭ с последующим конструированием детали из уже созданных элементов („игра в кубики“), для этого используется кнопка „Конструирование“, и система переводится в режим „Конструирование объекта“. Операция соединения объектов заключается в предварительном выводе таблицы, в которой указываются: объекты, которые нужно соединить между собой; используемые поверхности; способ их соединения (например, соосное прилегание).

После создания предварительного облика 3D-модели детали выполняется ее доработка. Для этого в CAD-системе, например, проставляются отклонения от взаимного расположения элементов, вводятся координирующие размеры и т.д. Например, размер С при формировании элемента Э1 может быть задан как собственный (см. рис. 2). Однако после соосного присоединения к такому элементу этот размер переводится в несобственный и вводится координирующий размер В. Если $A+C \neq B$, могут возникать „нестыковки“, которые необходимо устранить. После создания модели детали имеется возможность, используя кнопку „Вид“, показать параметрическую модель, а также геометрическую модель без обозначений параметров, как показано на рис. 4. Если удалить обозначения элемента (см. значок ) , то получится модель типа II. По этой модели при необходимости корректируется и выводится чертеж детали.

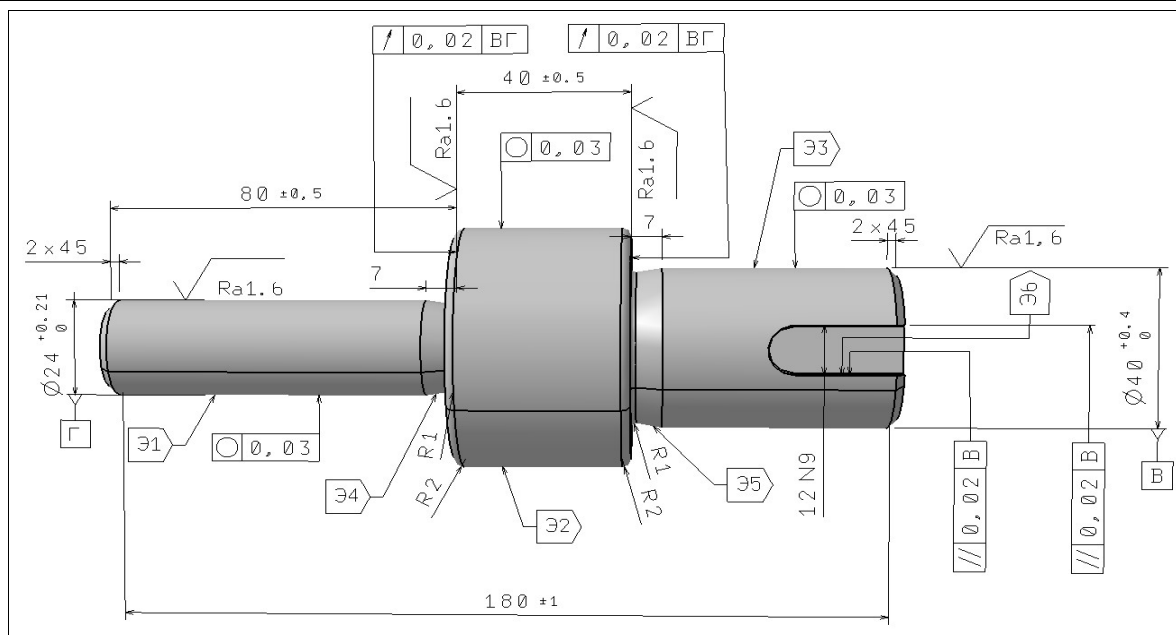


Рис. 4

Заключение. Проведенные исследования показали, что предложенный метод формирования моделей деталей открывает принципиальную возможность параллельного формирования ГМД и ПМД, что позволяет обеспечить согласованность передаваемых сообщений между САД и САПР ТП и ускоряет процесс проектирования как деталей, так и операционных заготовок.

Необходимость пополнять, корректировать и использовать библиотеку конструктивных элементов требует создания системы управления знаниями, включающей онтологии различных уровней [10] и систему их поддержки в актуальном состоянии. Системы конструкторской и технологической подготовки становятся достаточно сложными и для их интеграции необходимо уже применять PDM-систему. Эксперименты показали, что в данном случае может быть эффективно использована PDM-система SmarTeam и создано единое информационное пространство предприятия, позволяющее отслеживать жизненный цикл создаваемых моделей деталей и сборочных единиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника, 1979. 240 с.
2. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Под. ред. Г. К. Горанского. М.: Машиностроение, 1976.
3. Челищев Б. Е. и др. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
4. Олейников А. Я. Обеспечение интероперабельности информационных систем [Электронный ресурс]: <<https://www.itweek.ru/upload/iblock/6c4/oleynikov.pdf>>.
5. Баговрин В. К., Гуляев Ю. В., Олейников А. Я. Обеспечение интероперабельности — основная тенденция в развитии открытых систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 5. С. 7—15.
6. Яблочников Е. И. Организация единого информационного пространства технической подготовки производства с использованием PDM SmarTeam // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2001. № 3. С. 22—29.
7. Куликов Д. Д., Сагидулин А. С., Носов С. О. Интеграция САД-системы с системами автоматизированного проектирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 267—272.

8. Куликов Д. Д., Бабанин В. С. Создание параметрической модели детали в среде САД-системы // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 4(74). С. 167—169.
9. Бенкер К. MongoDB в действии. М.: ДМК Пресс, 2014. 396 с.
10. Куликов Д. Д. Интеграция систем технологической подготовки производства // Матер. 7-й междунар. науч.-практ. конф. „Современное машиностроение: Наука и образование“. СПб, 2018. С. 749—759.

Сведения об авторах

- Дмитрий Дмитриевич Куликов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; консультант
E-mail: ddkulikov@mail.ru
- Евгений Иванович Яблочников** — канд. техн. наук; доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники
- Артемию Валерьевич Чукичев** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: avchukichev@itmo.ru
- Оман Аскарбекович Абышев** — аспирант; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: abyshev.o@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.08.22; одобрена после рецензирования 12.09.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Tsvetkov V.D. *Sistemno-strukturnoye modelirovaniye i avtomatizatsiya proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov* (System-Structural Modeling and Automation of Design of Technological Processes), Minsk, 1979, 240 p. (in Russ.)
2. Goransky G.K., ed., *Avtomatizirovannyye sistemy tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v mashinostroyenii* (Automated Systems for Technological Preparation of Production in Mechanical Engineering), Moscow, 1976. (in Russ.)
3. Chelishchev B.E. et al. *Avtomatizatsiya proyektirovaniya tekhnologii v mashinostroyenii* (Automation of Technology Design in Mechanical Engineering), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)
4. <https://www.itweek.ru/upload/iblock/6c4/oleynikov.pdf>. (in Russ.)
5. Bagovrin V.K., Gulyaev Yu.V., Oleinikov A.Ya. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2009, no. 5, pp. 7–15 (in Russ.)
6. Yablochnikov E.I. *Information technology in design and production*, 2001, no. 3, pp. 22–29. (in Russ.)
7. Kulikov D.D., Sagidulin A.S., Nosov S.O. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 8(57), pp. 267–272. (in Russ.)
8. Kulikov D.D., Babanin V.S. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 4(74), pp. 167–169. (in Russ.)
9. Banker K. *MongoDB in Action*, Manning Publications, 2014, 312 p.
10. Kulikov D.D. *Sovremennoye mashinostroyeniye: Nauka i obrazovaniye* (Modern Mechanical Engineering: Science and Education), Proc. of the 7th Intern. Sci. and Pract. Conf., St. Petersburg, 2018, pp. 749–759. (in Russ.)

Data on authors

- Dmitry D. Kulikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Consultant; E-mail: ddkulikov@mail.ru
- Eugeny I. Yablochnikov** — PhD; Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics
- Artemiy V. Chukichev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: avchukichev@itmo.ru
- Oman A. Abyshev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: abyshev.o@yandex.ru

Received 22.08.22; approved after reviewing 12.09.22; accepted for publication 27.12.22.

**АНОМАЛЬНОЕ СЖАТИЕ СПЕКТРА
КАК СРЕДСТВО ПОЛУЧЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХПЛАНКОВСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

В. П. ХОДУНКОВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева
Санкт-Петербург, Россия
walkerearth@mail.ru*

Аннотация. С целью обоснования возможности создания узкополосного излучения сверхпланковской интенсивности исследованы методы создания высокоинтенсивного теплового излучения с заданной полосой спектра. Разработан метод, основанный на принципиально новом подходе к созданию высокоинтенсивных лучистых тепловых потоков. Метод заключается в сжатии исходного спектра излучения до спектра заданной ширины. Согласно методу, энергию исходного сплошного оптического излучения переизлучают в заданном, более узком, диапазоне спектра, для чего используют модификацию излучающей поверхности в виде упорядоченной твердотельной микроструктуры, трансформирующей спектр исходного излучения. Модифицированная излучающая поверхность создается системой одинаковых выступающих из плоской поверхности структурных элементов заданной формы. Размеры элементов и расстояния между ними рассчитывают исходя из требуемых интенсивности генерируемого излучения и диапазона его частот. Установлена и показана возможность генерации узкополосного излучения, превышающего по интенсивности планковское излучение в несколько раз. Разработанный метод востребован в метрологии температурных и оптических измерений, в научных исследованиях и промышленности. Метод может быть использован для сбора энергии, в производстве высокоэффективных оптических источников в инфракрасном диапазоне, в ИК-спектроскопии и в лазерной оптике, а также при разработке и создании настраиваемых источников инфракрасного излучения и других эффективных приложений в области энергетики.

Ключевые слова: аномальное сжатие, планковское излучение, переизлучение, интенсивность, упорядоченная структура, спектр

Ссылка для цитирования: Ходунков В. П. Аномальное сжатие спектра как средство получения сверхпланковской интенсивности // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 162—170. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-162-170.

**ANOMALOUS SPECTRUM COMPRESSION AS A MEANS OF OBTAINING RADIATION
OF SUPER-PLANCK INTENSITY**

V. P. Khodunkov

*D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology,
St. Petersburg, Russia
walkerearth@mail.ru*

Abstract. In order to substantiate the possibility of creating narrow-band radiation of super-Planck intensity, methods for creating high-intensity thermal radiation with a given spectral band have been studied. A method based on a fundamentally new approach to the creation of high-intensity radiant heat fluxes has been developed. The method consists in compressing the initial radiation spectrum to a spectrum of a given width. According to the method, the energy of the initial continuous optical radiation is re-emitted in a given, narrower range of the spectrum, for which a modification of the radiating surface is used in the form of an ordered solid-state microstructure that transforms the spectrum of the initial radiation. The modified radiating surface is created by a system of identical structural elements of a given shape protruding from a flat surface. The elements dimensions of the distances between them are found by calculation based on the required intensity and frequency range of the generated radiation. The possibility of generating narrow-band radiation exceeding Planck radiation by several times in intensity is established and demonstrated. The developed method is in demand in the metrology of temperature and optical measurements, in scientific research and in industry. The method can be used for energy harvesting, in the production of high-performance optical sources in the infrared range, in IR spectroscopy and laser optics, as well as in the development and creation of tunable infrared sources and other efficient applications in the field of energy.

Keywords: anomalous compression, Planck radiation, reradiation, intensity, ordered structure, spectrum

Введение. Узкополосное оптическое излучение с заданной полосой спектра традиционно получают из сплошного оптического излучения, для чего используют различные полосовые оптические фильтры. При этом интенсивность получаемого узкополосного излучения полностью зависит от интенсивности исходного излучения, но вследствие его частичного поглощения полосовым фильтром она всегда существенно меньше исходной (на 20—50 %). В свою очередь, для получения сплошного оптического излучения применяются следующие основные группы методов, которые основаны на использовании:

- инфракрасных излучателей, являющихся моделью абсолютно черного тела;
- оптического или дугового разряда (плазмы);
- плазмон-поляритонов (разновидности неизлучающих p -поляризованных поверхностных электромагнитных волн);
- явления частотного уширения (или аномального частотного уширения, или суперконтинуума белого света).

В первой группе методов получение сплошного оптического излучения достигается путем нагрева тугоплавких тел (например, вольфрамовой спирали, штифта Нернста, глобара и др.) до температуры 1273—2273 К либо использования графитовых или пирографитовых излучателей, выполненных в виде модели абсолютно черного тела (АЧТ), обеспечивающих достижение максимальной температуры 3200 К [1, 2]. Указанные методы обеспечивают получение инфракрасного излучения с высокими точностью и энергетической стабильностью, но не позволяют получать излучения, по интенсивности эквивалентные температурам плавления используемых тугоплавких тел.

Вторая группа методов основана на использовании оптического или дугового газового разряда, представляющего собой плазму. Плазма оптического разряда в различных газах, например в ксеноне, создаваемая сфокусированным лучом непрерывного лазера, является источником сплошного излучения с одним из самых высоких значений интенсивности. Плазма, создаваемая дуговым разрядом, обладает меньшей интенсивностью, но лучшей энергетической стабильностью. Для получения интенсивного излучения на основе плазмы используются различные методы [3—5]. Основным недостатком методов этой группы заключается в том, что энергетическая стабильность излучения невысока — флуктуации интенсивности излучения достигают 5 %.

Третья группа методов основана на явлении порождения фононами кристаллической решетки твердого тела поверхностных плазмон-поляритонов, являющихся разновидностью неизлучающих p -поляризованных поверхностных электромагнитных волн [6, 7]. Эти методы не позволяют получать излучение с требуемой высокой интенсивностью, эквивалентной, например, температуре АЧТ 3200 К или выше. Кроме этого, относительно невысока энергетическая стабильность генерируемого излучения.

Четвертая группа методов основана на генерации так называемого суперконтинуума, замещающего белый свет (видимый и инфракрасный диапазон) [8, 9]. Лазерные устройства (так называемые белые лазеры, или лазеры-суперконтинуумы), реализующие указанный способ генерации, позволяют получать узкополосное излучение в заданной полосе частот с высокой энергетической стабильностью. Преимущество указанных лазеров — обеспечение высокой стабильности излучения. Так, например, лазер-суперконтинуум „SuperK EVO-04“ совместно с акустооптическим фильтром „SuperK Varia“, выпускаемыми фирмой „NKT Photonics“ (Дания), обеспечивают флуктуации мощности излучения 1 %, а при введении в схему излучателя оптической отрицательной обратной связи флуктуации интенсивности

излучения составляют 0,01—0,001 %. Это полностью обеспечивается благодаря отрицательной обратной связи, традиционно используемой в лазерных системах стабилизации [10]. Недостаток данных методов — невозможность генерации интенсивного излучения. В частности, самые мощные лазеры типа „суперконтинуум“ в диапазоне длин волн 500—700 нм обеспечивают получение спектральной мощности в пучке не выше 6 мВт/(нм·мм²) [11]. Такая мощность излучения соответствует спектральной энергетической яркости модели АЧТ при термодинамической температуре ≈ 3600 К.

Не так давно разработан метод генерации стабилизированного квазимонохроматического инфракрасного высокоинтенсивного излучения, в котором осуществляется последовательная пространственная интеграция нескольких фоновых излучений высокой интенсивности с дополнительным излучением малой интенсивности. При этом выполняется селекция флуктуационной составляющей суммарного излучения, величину которой минимизируют за счет регулирования интенсивности дополнительного излучения [12]. Данный метод позволяет получать довольно интенсивное стабилизированное квазимонохроматическое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 2000 нм с шириной полосы от 5 до 100 нм.

Главный и общий неустранимый недостаток всех перечисленных методов — необходимость применения полосового оптического фильтра, что существенно снижает интенсивность получаемого узкополосного излучения.

Известно устройство сжатия оптического импульса на дифракционных решетках с возможностью регулировки длительности сжатого импульса [13]. Такой эффект достигается за счет дифракционных решеток, которые образуют две зеркально симметричные группы. В результате достигается возможность регулирования дисперсии групповой скорости импульса, в то же время устройство не обеспечивает сжатия непрерывного оптического излучения из широкого диапазона спектра.

В работе [14] представлена идея трехмерного фотонного кристалла, который при нагреве способен генерировать излучение с интенсивностью, выходящей за пределы закона Планка. Кристаллическая структура такого фотонного кристалла похожа на структуру алмаза, а материал кристалла имеет оптический резонатор, который дополнительно сужает спектр излучения. Фотонный кристалл сжимает испускаемый спектр до диапазона шириной около одного микрометра. Резонатор позволяет сократить это значение до 0,07 мкм. Интенсивность излучения такого фотонного кристалла в восемь раз выше, чем у черного тела, таким образом, кристалл обеспечивает восьмикратное превышение интенсивности планковского излучения. Недостаток данной разработки — возможность ее применения ограничена частным случаем длины волны излучения ($\lambda=1,7$ мкм) и не может быть распространена на другие длины волн и другие температуры, так как взаимосвязь параметров фотонного кристалла с пиковой длиной волны, температурой кристалла авторами разработки не раскрыта.

Достигнутый уровень развития науки и техники в этой области может быть охарактеризован следующим образом. Известные методы и реализующие их устройства генерации узкополосного излучения:

- обеспечивают генерацию интенсивного узкополосного излучения, но с низкой энергетической стабильностью (вторая группа способов);

- либо обеспечивают генерацию узкополосного излучения с заданной высокой энергетической стабильностью, но с недостаточно высокой интенсивностью излучения (первая, третья и четвертая группа способов);

- либо обеспечивают генерацию строго монохроматического излучения (но не узкополосного) с заданными высокими энергетической стабильностью и интенсивностью (монохроматические лазеры),

- либо обеспечивают получение излучения сверхвысокой интенсивности, но только в одном частном случае.

Цель настоящего исследования — разработать метод генерации теплового излучения, в заданном узком спектре превосходящего по интенсивности планковское излучение.

Описание метода. В результате проведенного исследования для достижения поставленной цели предложено энергию исходного сплошного оптического излучения переизлучать в заданном более узком диапазоне спектра, т.е. выполнять аномальное сжатие спектра. Для этого разработана упорядоченная твердотельная поверхностная микроструктура, состоящая из расположенных на твердотельном основании одинаковых структурных элементов заданной формы, с геометрическими размерами и расстоянием между ними, заданными исходя из требуемой интенсивности генерируемого излучения [15, 16]. Разработанный метод несколько схож с методом, предложенным в работе [14] — здесь также используется новый базовый принцип формирования излучения: структурные элементы объемной упорядоченной структуры, аккумулирующие энергию падающих фотонов, выполняют функцию фотонных резонаторов и образуют, используя терминологию зарубежных ученых, „фотонный кристалл“. Этот кристалл напоминает лазер, который излучает в заданном узком диапазоне длин волн. Интенсивность генерируемого излучения связана с геометрическими размерами упорядоченной структуры соотношением:

$$I = \varepsilon \left(\frac{S + 2h - a}{h + a} \right) I_0,$$

где I — средняя по заданному спектру интенсивность генерируемого узкополосного оптического излучения, Вт/м³; I_0 — средняя по исходному спектру интенсивность исходного сплошного оптического излучения, Вт/м³; ε — излучательная способность материала структурных элементов, осредненная по заданному узкому диапазону спектра генерируемого излучения, о.е.; S — расстояние между смежными структурными элементами, которое принимают равным центральной длине волны заданного узкого диапазона спектра генерируемого излучения, м; h , a — высота и характерный размер поперечного сечения структурного элемента соответственно, м.

В предложенном методе в качестве исходного источника излучения либо используют стабилизированное сплошное оптическое излучение от внешнего источника и с помощью микроструктуры переизлучают его, либо используют стабилизированное тепловое излучение нагретого твердого тела, при этом упорядоченную твердотельную микроструктуру формируют непосредственно на излучающей поверхности нагретого твердого тела, а для расчета интенсивности исходного оптического излучения используют формулу Планка. Кроме того, структурные элементы выполняют в форме параллелепипедов квадратного сечения (или стержней), одна из граней (торцевых поверхностей) которых находится в механическом и тепловом контакте с твердотельным основанием.

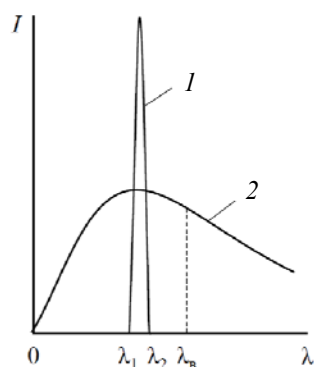


Рис. 1

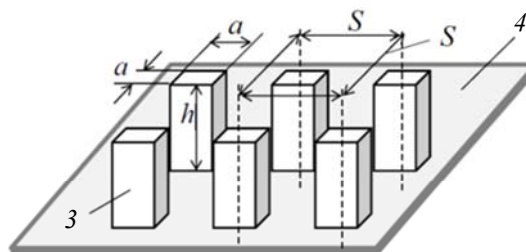


Рис. 2

На рис. 1 представлена графическая интерпретация метода — приведено спектральное распределение интенсивности генерируемого узкополосного излучения (кривая 1) и исходного сплошного оптического излучения (2). На рис. 2 приведена упорядоченная твердотельная микроструктура, с помощью которой обеспечивается генерация заданного узкополосного

излучения. Упорядоченная твердотельная микроструктура состоит из одинаковых структурных элементов 3, выполненных в виде одинаковых параллелепипедов либо цилиндров, которые расположены на твердотельном основании 4.

Сущность метода заключается в следующем. Предварительно еще раз необходимо отметить, что аналогичные технические решения предложены зарубежными учеными, в частности, недавно (2019—2020 гг.) ученые из США и Канады продемонстрировали работу принципиально нового источника излучения, которому для работы необходим только нагрев, но при этом он излучает в узкой полосе в инфракрасной области ярче АЧТ. Устройство на основе фотонных кристаллов сужает диапазон излучения, из-за чего светимость в нем оказывается более чем в восемь раз выше, чем у нагретого до такой же температуры тела. Авторы называют такой феномен сверхпланковским излучением и считают, что он может найти применение в области преобразования рассеиваемого тепла в полезную энергию, системах обнаружения объектов в темноте и как яркий источник в оптических исследованиях [14, 17]. Кроме того, в последнее время появлялись работы, в которых говорилось о похожих результатах. Однако в них речь шла либо о ближней зоне излучения, из чего нельзя сделать вывод о полноценном выходе таких электромагнитных волн из материала, либо сравнение с чернотельным источником проводилось недостаточно тщательно. Также исследователи пока не могут предложить полноценную теорию этого эффекта, но в качестве наиболее вероятной гипотезы они используют влияние локализованных поверхностных плазмонов — квазичастиц колебаний электронного газа, которые ограничены структурой излученного вещества.

В одном из отмеченных выше методов-аналогов генерация заданного узкополосного излучения осуществляется с помощью суперконтинуума, замещающего белый свет, т.е. так называемого „белого лазера“, принцип действия которого основан на искусственном экстремальном уширении исходного спектра излучения — процессе, зеркально противоположном процессу в предложенном методе, который заключается в экстремальном (аномальном) сжатии исходного спектра оптического излучения.

Предложенный метод позволяет с помощью упорядоченной микроструктуры переизлучать энергию, сосредоточенную в заданном диапазоне исходного спектра сплошного оптического излучения, в более узком спектре излучения с заданной шириной полосы (см. рис. 1). Математически этот процесс переизлучения энергии можно описать следующим образом:

$$E_0 \sim \int_0^{\lambda_B} I_0(\lambda) d\lambda \rightarrow E = \varepsilon E_0 \sim \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где E_0 — энергия, сосредоточенная в диапазоне $\lambda = 0—\lambda_B$ исходного спектра сплошного оптического излучения; E — переизлученная энергия в заданном более узком спектральном диапазоне $\lambda = \lambda_1—\lambda_2$; $\varepsilon < 1$; λ — длина волны; $I_0(\lambda)$ — спектральная интенсивность исходного сплошного оптического излучения; $I(\lambda)$ — спектральная интенсивность переизлученного (сгенерированного) излучения в заданном более узком спектральном диапазоне $\lambda = \lambda_1—\lambda_2$, при этом $(\lambda_2 - \lambda_1) \ll \lambda_B$ (λ_B — верхняя спектральная граница диапазона аккумулируемого излучения).

При оценке ожидаемой интенсивности генерируемого излучения оперируют средними значениями интенсивности по соответствующему диапазону спектра:

$$I_0 = \frac{1}{\lambda_B} \int_0^{\lambda_B} I_0(\lambda) d\lambda \text{ — средняя по исходно заданному спектру } (0—\lambda_B) \text{ интенсивность ис-}$$

ходного сплошного оптического излучения, Вт/м³,

$$I = \frac{\varepsilon}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda \text{ — средняя по заданному спектру } (\lambda_1—\lambda_2) \text{ интенсивность генери-}$$

руемого узкополосного оптического излучения, Вт/м³.

Главное условие, при котором структурные элементы 3 (см. рис. 2) начинают аккумулировать энергию фотонов из заданного диапазона исходного сплошного оптического излучения $\lambda = 0 \text{—} \lambda_b$ и переизлучать ее в более узком диапазоне $\lambda = \lambda_1 \text{—} \lambda_2$, формулируется следующим образом: $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \approx h + a$.

При этом верхняя спектральная граница λ_b диапазона аккумулируемого излучения равна длине контура полости $S+2h-a$, образованной двумя смежными структурными элементами. Переизлучение накопленной энергии в заданном более узком спектральном диапазоне осуществляется благодаря резонаторам, образованным полостями между смежными структурными элементами 3.

Если используется стабилизированное излучение от внешнего источника, которое с помощью микроструктуры переизлучается, для оценки интенсивности генерируемого узкополосного излучения по соотношению (1) необходимо знать спектральную интенсивность излучения внешнего источника, значение которой берут либо из паспортных данных данного источника, либо измеряют экспериментально с помощью спектрометра.

В случае, когда используется стабилизированное тепловое излучение нагретого твердого тела, а упорядоченная твердотельная микроструктура формируется непосредственно на излучающей поверхности данного нагретого твердого тела, спектральная интенсивность исходного оптического излучения рассчитывается по формуле Планка:

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(c_2/\lambda T) - 1)},$$

где c_1, c_2 — первая и вторая радиационные постоянные; T — термодинамическая температура нагретого твердого тела.

При составлении расчетного соотношения (1) принято допущение, что спектральная излучательная способность материала структурных элементов ϵ незначительно изменяется в рассматриваемом спектральном диапазоне $\lambda_1 \text{—} \lambda_2$, поэтому она принята величиной постоянной, осредненной по заданному спектру, и вынесена за знак интеграла. Для оценочных расчетов это вполне допустимо.

Пример реализации метода. Пусть, например, требуется получить интенсивное узкополосное излучение в заданном спектральном диапазоне $\lambda = 1,5 \text{—} 1,7$ мкм ($\lambda_1 = 1,5$; $\lambda_2 = 1,7$ мкм). Для получения искомого излучения задают следующие геометрические параметры структурных элементов 3 твердотельной упорядоченной микроструктуры: $S = (\lambda_1 + \lambda_2)/2 = 1,6$ мкм; $a = 0,1$ мкм; $h = 0,1$ мкм. При этом размеры структурных элементов h, a задают такими, чтобы было соблюдено условие $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = h + a = 0,2$ мкм.

Для лучшей демонстрации преимуществ представленного метода рассмотрим случай, когда в качестве исходного оптического излучения используется стабилизированное тепловое излучение нагретого твердого тела, а упорядоченная твердотельная микроструктура формируется непосредственно на его излучающей поверхности, при этом в качестве твердого тела возьмем модель АЧТ, выполненную из графита ($\epsilon = 0,95$) и находящуюся при максимально достижимой в настоящее время температуре 3473 К. В этом случае для расчета спектральной интенсивности исходного оптического излучения используют формулу Планка:

$$I = \epsilon \left(\frac{S + 2h - a}{h + a} \right) I_0 = 0,95 \left(\frac{1,6 + 2 \cdot 0,1 - 0,1}{0,1 + 0,1} \right) 4,013 \cdot 10^{12} = 3,24 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^3.$$

Интенсивность полученного узкополосного излучения эквивалентна излучению традиционного АЧТ (без упорядоченной микроструктуры) на центральной длине волны 1,6 мкм и при термодинамической температуре $\approx 12\,100$ К. Для сравнения: с помощью традиционного АЧТ, находящегося при 3473 К, с учетом поглощения полосового фильтра (20 %) на центральной длине волны 1,6 мкм можно получить максимально достижимую интенсивность излучения $2,32 \cdot 10^{12}$ Вт/м³, что эквивалентно термодинамической температуре 3215 К и на 8885 К ниже, чем обеспечивает предложенный метод.

Заключение. Таким образом, подобрав геометрические размеры твердотельной упорядоченной микроструктуры, возможно получать требуемое узкополосное излучение высокой интенсивности. В качестве основы упорядоченной структуры можно использовать известные технологии, например, представленные в работах [18, 19].

Предложенный метод позволит, например, существенно повысить верхний температурный предел воспроизводимой температуры моделями АЧТ, основанными на применении нагрева тугоплавких тел: для длины волны $\lambda_p = 0,65$ мкм верхний предел может быть увеличен с 3356 до 3800 К. Кроме того, предложенный метод может быть использован для сбора энергии в производстве высокоэффективных оптических источников в инфракрасном диапазоне, в ИК-спектроскопии и лазерной оптике, а также при разработке и создании настраиваемых источников инфракрасного излучения и других эффективных приложений в области энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
2. Пат. РФ 2148801, МПК G01J 5/02. Модель черного тела / Б. Б. Хлевной, В. Б. Хромченко и др. Заяв. № 98116351 от 25.08.1998. Оpubл. 10.05.2000. Бюл. № 13.
3. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
4. Пат. РФ 2497227, МПК H01J 61/72. Способ генерации излучения на резонансных переходах атомов металлов / В. А. Долгих, Л. П. Менахин и др. Заяв. № 2012101983 от 27.01.2012. Оpubл. 27.10.2013. Бюл. № 30.
5. Пат. РФ 2501146, МПК H02J 17/00. Способ генерации электромагнитного излучения / И. А. Иванов, А. В. Аржанников и др. Заяв. № 2012130121 от 16.07.2012. Оpubл. 10.12.2013. Бюл. № 34.
6. Виноградов Е. А., Жижин Г. Н., Мальшиков А. Г. Термостимулированное излучение поверхностных поляритонов // ЖЭТФ. 1977. Т. 73, № 4. С. 1480—1485.
7. Пат. РФ 2642912, МПК G01J 3/08, G01J 1/08. Способ генерации непрерывного широкополосного инфракрасного излучения с регулируемым спектром / А. К. Никитин, И. Ш. Хасанов, Та Тху Чанг. Заяв. № 2016140354 от 13.10.2016. Оpubл. 29.01.2018. Бюл. № 4.
8. Fork R. L., Tomlinson W. J., Shank C. V., Hirliman C., Yen R. Femtosecond white-light continuum pulses // Optic Letters. 1983. Vol. 8, N 1. P. 1—3.
9. Камынин В. А. Генерация суперконтинуума двухмикронного диапазона в оптических волокнах на основе кварцевого стекла: Дис. ... канд. физ.-мат. наук, М.: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2014. 112 с.
10. Климкина Ю. Ю., Биленко И. А. Нестационарные флуктуации интенсивности и направления излучения YAG-лазера // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2012. Т. 76, № 12. С. 1431—1433.
11. Каталог фирмы „NKT Photonics“ [Электронный ресурс]: <<http://www.nktphotonics.com>>.
12. Пат. РФ 2727350, МПК G05D 25/00, H05B 47/10. Способ генерации стабилизированного квазимонохроматического инфракрасного излучения высокой интенсивности / В. П. Ходунков. Заяв. № 2019141903 от 13.12.2019. Оpubл. 21.07.2020. Бюл. № 21.
13. Пат. РФ 2684929, МПК H01S 3/10, G02B 26/00. Устройство сжатия оптического импульса на дифракционных решетках с возможностью регулировки длительности сжатого импульса / А. А. Маслин, А. В. Жаворонкин. Заяв. № 2018111595 от 16.04.2019. Оpubл. 16.04.2019. Бюл. № 11.
14. Hsieh M.-L., Lin Sh.-Y., Sajeev J., Bur J. A., Wang X., Narayanan Sh. and Luk T.-Sh. Super Planckian Thermal Radiation Emitted From a Nano-Filament of Photonic Crystal: A Direct Imaging Study // IEEE Photonics J. 2019. Vol. 11, N 6. DOI:10.1109/JPHOT.2019.2948995.
15. Пат. РФ 2759698, МПК G05D 25/00, G02F 1/39, G01J 3/10. Способ получения узкополосного отраженного излучения, превосходящего по интенсивности исходное падающее излучение / В. П. Ходунков. Заяв. № 2020133723 от 23.11.2020. Оpubл. 16.11.2021. Бюл. № 32.
16. Пат. РФ 2020 125 709 А, МПК G05D 25/0. Способ генерации узкополосного излучения сверхпланковской интенсивности / В. П. Ходунков. Заяв. № 2020138457 от 27.17.2020. Оpubл. 27.01.2022. Бюл. № 3.

17. Lin Sh.-Y., Hsieh M.-L., Sajeev J., Frey B., Bur J. A., Luk T.-Sh., Wang X. & Narayanan Sh. An In-situ and Direct Confirmation of Super-Planckian Thermal Radiation Emitted from a Metallic Photonic-Crystal at Optical Wavelengths // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 5209. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62063-2>.
18. Пат. РФ 2 368 030 C2, МПК H01L 21/205. Полупроводниковая подложка, полупроводниковое устройство и способ получения полупроводниковой подложки / М. Одноблюдов, В. Бугров, А. Романов, Т. Ланг. Заявл. 19.05.2005. Оpubл. 20.09.2009. Бюл. № 26.
19. Пат. РФ 2014 127 476 А, МПК G02B 5/18. Элемент отображения, фольга переноса и изделие с элементом отображения / Кубо Акира, Савамура Тикара, Ясики Кадзухиро. Заявл. 05.12.2012. Оpubл. 10.07.2016. Бюл. № 19.

Сведения об авторе

Вячеслав Петрович Ходунков

— канд. техн. наук; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики; старший научный сотрудник, аналитик; E-mail: walkerearth@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.22; одобрена после рецензирования 11.07.22; принята к публикации 27.12.22.

REFERENCES

1. Kriksunov L.Z. *Spravochnik po osnovam infrakrasnoy tekhniki* (Handbook of Fundamentals of Infrared Engineering), Moscow, 1978, 400 p. (in Russ.)
2. Patent RU 2148801, *Model' chernogo tela* (Black Body Model), B.B. Khlevnoy, V.B. Khromchenko, N.A. Ibragimov, V.I. Shapoval, V.I. Sapritskiy, Published 05.2000 (in Russ.)
3. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* (Physics of a Gas Discharge), Moscow, 1992, 536 p. (in Russ.)
4. Patent RU 2497227, H01J 61/72, *Sposob generatsii izlucheniya na rezonansnykh perekhodakh atomov metallov* (Method of Radiation Generation on Resonant Transitions of Metal Atoms), V.A. Dolgikh, L.P. Menakhin et al., Patent application no. 2012101983, Priority 27.01.2012, Published 27.10.2013, Bulletin 30. (in Russ.)
5. Patent RU 2501146, H02J 17/00, *Sposob generatsii elektromagnitnogo izlucheniya* (Method for Generating Electromagnetic Radiation), I.A. Ivanov, A.V. Arzhannikov et al., Patent application no. 2012130121, Priority 16.07.2012, Published 10.12.2013, Bulletin 34. (in Russ.)
6. Vinogradov E.A., Zhizhin G.N., Malshukov A.G. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1977, no. 4(73), pp. 1480–1485. (in Russ.)
7. Patent RU 2642912, G01J 3/08, G01J 1/08, *Sposob generatsii nepreryvnogo shirokopolosnogo infrakrasnogo izlucheniya s reguliruyemym spektrom* (A Method for Generating Continuous Broadband Infrared Radiation with an Adjustable Spectrum), A.K. Nikitin, I.Sh. Khasanov, Ta Thu Chang, Patent application no. 2016140354, Priority 13.10.2016, Published 29.01.2018, Bulletin 4. (in Russ.)
8. Fork R.L., Tomlinson W.J., Shank C.V., Hirliman C., Yen R. *Optic Letters*, 1983, no. 1(8), pp. 1–3.
9. Kamynin V.A. *Generatsiya superkontinuum dvukhmikronnogo diapazona v opticheskikh voloknakh na osnove kvartsevoogo stekla* (Generation of a Two-Micron Supercontinuum in Optical Fibers Based on Quartz Glass), Candidate's thesis, Moscow, 2014, 112 p. (in Russ.)
10. Klimkina Y.Y., Bilenko I.A. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2012, no. 12(76), pp. 1277–1279.
11. <http://www.nktphotonics.com>.
12. Patent RU 2727350, G05D 25/00, H05B 47/10, *Sposob generatsii stabilizirovannogo kvazimonokhromaticheskogo infrakrasnogo izlucheniya vysokoy intensivnosti* (Method for Generating Stabilized Quasi-Monochromatic Infrared Radiation of High Intensity), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2019141903, Priority 13.12.2019, Published 21.07.2020, Bulletin 21. (in Russ.)
13. Patent RU 2684929, H01S 3/10, G02B 26/00, *Ustroystvo szhatiya opticheskogo impul'sa na difraktsionnykh reshetkakh s vozmozhnost'yu regulirovki dlitel'nosti szhatogo impul'sa* (Device for Compression of an Optical Pulse on Diffraction Gratings with the Possibility of Adjusting the Duration of the Compressed Pulse), A.A. Mastin, A.V. Zhavoronkin, Patent application no. 2018111595; Priority 16.04.2019; Published 16.04.2019, Bulletin 11. (in Russ.)
14. Hsieh M.-L., Lin Sh.-Y., Sajeev J., Bur J.A., Wang X., Narayanan Sh. and Luk T.-Sh., *IEEE Photonics Journal*, 2019, no. 6(11), DOI:10.1109/JPHOT.2019.2948995.
15. Patent RU 2759698, G05D 25/00, G02F 1/39, G01J 3/10, *Sposob polucheniya uzkopolosnogo otrazhennogo izlucheniya, prevoskhodyashchego po intensivnosti iskhodnoye padayushcheye izlucheniye* (Method for Obtaining Narrow-Band Reflected Radiation, Exceeding the Original Incident Radiation in Intensity), V.P. Khodunkov, Patent application no. 2020133723, Priority 23.11.2020, Published 16.11.2021, Bulletin 32. (in Russ.)
16. Patent RU 2020 125 709 A, G05D 25/0. *Sposob generatsii uzkopolosnogo izlucheniya sverkhplankovskoy intensivnosti* (Method for Generating Narrow-Band Radiation of Super-Planck Intensity), V.P. Khodunkov, Priority 27.17.2020, Published 27.01.2022, Bulletin 3. (in Russ.)
17. Lin Sh.-Y., Hsieh M.-L., Sajeev J., Frey B., Bur J.A., Luk T.-Sh., Wang X., & Narayanan Sh., *Scientific Reports*, 2020, no. 10, pp. 5209, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62063-2>.
18. Patent RU 2 368 030 C2, H01L 21/205, *Poluprovodnikovaya podlozhka, poluprovodnikovoye ustroystvo i sposob*

polucheniya poluprovodnikovoy podlozhki (Semiconductor Substrate, Semiconductor Device and Method for production of Semiconductor Substrate), M. Odnobljudov, V. Bugrov, A. Romanov, T. Lang, Priority 19.05.2005, Published 20.09.2009, Bulletin 26. (in Russ.)

19. Patent RU2014 127 476 A, G02B 5/18, *Element otobrazheniya, fol'ga perenosa i izdeliye s elementom otobrazheniya* (Display Element, Transfer Foil and Product with Display Element), Kubo Akira, Savamura Tikara, Yasiki Kadzukhiro, Priority 05.12.2012, Published 10.07.2016, Bulletin 19. (in Russ.)

Data on author

Vyacheslav P. Khodunkov — PhD; D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Department of Measurement Standards and Investigations in the Field of Thermodynamics; Senior Researcher, Analyst; E-mail: walkerearth@mail.ru

Received 31.05.22; approved after reviewing 11.07.22; accepted for publication 27.12.22.