

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

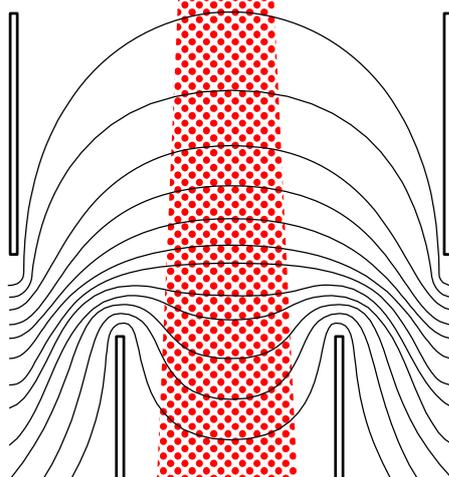
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **4**

Т. 65
2022

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



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

проф. А. А. БОБЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. П. АЛЕШКИН, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
В. В. ГРИГОРЬЕВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. П. ГУРОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. ЕФИМОВ, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
Т. А. ИСМАИЛОВ, проф., ДГТУ, Махачкала, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. О. НИКИФОРОВ, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. Я. РАСПОПОВ, проф., ТГУ, Тула, Россия
Л. А. СЕВЕРОВ, проф., ГУАП, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
В. С. ТИТОВ, проф., ЮЗГУ, Курск, Россия
В. С. ТОМАСОВ, доц., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. Б. ФЕДОРОВ, акад. РАН, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
В. Б. ШЛИШЕВСКИЙ, проф., СГГА, Новосибирск, Россия
А. С. ЮЩЕНКО, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

С. В. АБЛАМЕЙКО, акад. НАН Беларуси, БГУ, Минск, Беларусь
Р. М. АЛГУЛИЕВ, акад. НАН Азербайджана, Институт информационных технологий НАНА, Баку, Азербайджан
Т. ЗЕЕГЕР, проф., Университет Зигена, Зиген, Германия
Т. ОРЛОВСКА-КОВАЛЬСКА, проф., Университет Технологий, Вроцлав, Польша
Э. РОМЕРО-КАДАВАЛ, проф., Университет Экстремадура, Бадайоз, Испания
Р. СТЖЕЛЕЦКИ, проф., Институт Электротехники в Варшаве, Гдыня, Польша

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 28.04.2022 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.ifmo.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, междустрочный 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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Ефанов Д. В., Пашуков А. В. Взвешенные коды с суммированием в кольце вычетов по произвольному модулю для синтеза цифровых вычислительных устройств.....231

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Данилова Т. В., Архипова М. А., Маслова М. А. Автономный метод формирования оценок параметров ориентации звездных датчиков 247

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры..... 254

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Никитин М. М., Коняхин И. А., Добрых Ф. Г. Алгоритм измерения углов поворота объекта автоколлимационным методом при использовании триэдрического отражателя с цилиндрической гранью..... 262

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Бакурский К. В., Макаров А. А., Мысливцев Т. О., Никифоров С. В. Метод формирования групповой шкалы времени радиотехнических комплексов на основе адаптивной полиномиальной аппроксимации данных271
- Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Экспериментальная оценка износостойкости пары трения типа „диск по диску“280
- Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И., Бибиков С. В. Методы оценки технического состояния транспортного средства при помощи вибродиагностики287
- Арефьев А. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Удахина С. В. Исследование постинъекционного эпидермиса модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо295

EDITOR-IN-CHIEF

prof. ALEXEY BOBTSOV

EDITORIAL BOARD

ALESHKIN ANDREY, prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

GRIGORIEV VALERY, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

GUROV IGOR, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

EFIMOV VLADIMIR, prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

ISMAILOV TAGIR, prof., DSTU, Makhachkala, Russia

MUSALIMOV VIKTOR, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

NIKIFOROV VLADIMIR, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

PYRKIN ANTON, prof., Deputy Chief Editor, ITMO University, St. Petersburg, Russia

RASPOPOV VLADIMIR, prof., TSU, Tula, Russia

SEVEROV LEONID, prof., SUAI, St. Petersburg, Russia

SOKOLOV BORIS, prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia

TITOV VITALY, prof., SWSU, Kursk, Russia

TOMASOV VALENTIN, prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia

FEDOROV IGOR, acad., N. E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

FILIMONOV NIKOLAY, prof., Deputy Chief Editor, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

SHLISHEVSKY VIKTOR, prof., SSGA, Novosibirsk, Russia

YUSHCHENKO ARKADY, prof., N. E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

FOREIGN MEMBERS

ABLAMEYKO SERGEY, acad., Belarusian State University, Minsk, Belarus

ALGULIYEV RASIM, acad., Institute of Information Technology of ANAS, Baku, Azerbaijan

ORLOWSKA-KOWALSKA TERESA, prof., University of Technology, Wroclaw, Poland

ROMERO-CADAVAL ENRIQUE, prof., University of Extremadura, Badajoz, Spain

SEEGER THOMAS, prof., University of Siegen, Siegen, Germany

STRZELECKI RYSZARD, prof., Electrotechnical Institute in Warsaw, Gdynia, Poland

Executive secretary *Marina V. Lebetskaya*

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

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65

APRIL 2022

No 4

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

- Efanov D. V., Pashukov A. V.** Weighted Codes with Summation in the Ring of Residues
by an Arbitrary Modulus for the Synthesis of Digital Computing Devices 231

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Danilova T. V., Arkhipova M. A., Maslova M. A.** Autonomous Method for Forming Esti-
mations of the Star Trackers Orientation Parameters 247

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Bondar O. G., Brezhneva E. O., Rodionov P. S.** Multi-Channel Temperature Converter 254

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Nikitin M. M., Konyakhin I. A., Dobrykh F. G.** Algorithm for Object Rotation Angles
Measuring by the Autocollimation Method Using a Trihedral Reflector with a Cylindrical
Face 262

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Bakurskiy K. V., Makarov A. A., Myslivtsev T. O., Nikiforov S. V.** Method for For-
mation of Group Time Scale of Radio Engineering Complexes Based on Adaptive
Polynomial Data Approximation 271

- Efremov L. V., Tikalov A. V.** Experimental Evaluation of the Wear Resistance of a Disc-on-
Disc Friction Pair 280

- Tkalich V. L., Kalinkina M. E., A. G. Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I.,
Bibikov S. V.** Methods for Assessing a Vehicle Technical Condition Using Vibration
Diagnostics 287

- Arefiev A. V., Kurlov B. B., Kotskovich V. B., Maiorov E. E., Pushkina V. P.,
Udakhina S. V.** Examination of the Post-Injection Epidermis with a Modified Michel-
son—Fizeau Interferometer 295

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@itmo.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

**ВЗВЕШЕННЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ В КОЛЬЦЕ ВЫЧЕТОВ
ПО ПРОИЗВОЛЬНОМУ МОДУЛЮ
ДЛЯ СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Д. В. ЕФАНОВ* А. В. ПАШУКОВ

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

Аннотация. При синтезе самопроверяемых и отказоустойчивых цифровых вычислительных систем часто применяются двоичные избыточные коды. Их использование позволяет снизить структурную избыточность для наделения устройств свойством самопроверяемости или отказоустойчивости. Приведены результаты исследования широкого класса кодов с суммированием, при построении которых используются заранее выбираемые последовательности весовых коэффициентов и процедура суммирования в кольце вычетов по предварительно зафиксированному модулю. Рассмотрены коды с тремя последовательностями весовых коэффициентов: 1) натуральный ряд; 2) натуральный ряд за исключением степеней числа 2; 3) чередующиеся последовательности возрастающих степеней числа 2. Установлены характеристики обнаружения ошибок кодами по кратностям и видам (монотонные, симметричные и асимметричные). Приведены условия построения помехозащищенных кодов, а также методы модификации кодов для наделения их свойством помехозащищенности. Представлены результаты экспериментов с контрольными комбинационными схемами по применению описанных кодов для обнаружения ошибок на их выходах. Обсуждаются особенности применения модульных взвешенных кодов с суммированием при синтезе цифровых устройств.

Ключевые слова: самопроверяемые и отказоустойчивые устройства, коды с суммированием, обнаружение ошибок в информационных векторах, суммирование в кольце вычетов по установленному модулю, весовые коэффициенты разрядов

Ссылка для цитирования: Ефанов Д. В., Пашуков А. В. Взвешенные коды с суммированием в кольце вычетов по произвольному модулю для синтеза цифровых вычислительных устройств // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 231—246. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-231-246.

**WEIGHTED CODES WITH SUMMATION IN THE RING OF RESIDUES BY AN ARBITRARY MODULUS
FOR THE SYNTHESIS OF DIGITAL COMPUTING DEVICES**

D. V. Efanov*, A. V. Pashukov

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

Abstract. In the synthesis of self-checking and fault-tolerant digital computing systems, binary redundant codes are often used. Their use makes it possible to reduce structural redundancy in order to endow devices with the property of self-checking or fault tolerance. Results of the study of a wide class of codes with summation are presented, in the construction of which preselected sequences of weight coefficients and the summation procedure in the ring of residues by a preliminarily fixed modulus are used. Codes with three sequences of weight coefficients are considered: 1) natural

numbers; 2) natural series except for powers of 2; 3) alternating sequences of increasing powers of the number 2. Characteristics of error detection by codes by multiplicities and types (monotonic, symmetric and asymmetric) are established. Conditions for constructing noise-immune codes, as well as methods for modifying codes to endow them with the property of noise immunity, are given. Results of experiments with control combinational circuits on the use of the described codes for error detection at their outputs are presented. The features of the use of modular weighted codes with summation in the synthesis of digital devices are discussed

Keywords: self-checking and fault-tolerant devices, codes with summation, error detection in information vectors, summation in the ring of residues modulo, weight coefficients of digits

For citation: Efanov D. V., Pashukov A. V. Weighted codes with summation in the ring of residues by an arbitrary modulus for the synthesis of digital computing devices. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 231—246 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-231-246.

Введение. При синтезе самопроверяемых и отказоустойчивых цифровых вычислительных устройств часто применяются методы теории информации и кодирования [1—6]. Надеждение устройства свойствами обнаружения и исправления возникающих в ходе эксплуатации ошибок, а также локализация источника неисправности требуют дополнительных аппаратных или программных средств [7, 8]. Избыточность вносится на этапе синтеза устройства с учетом выбранной модели неисправностей (множества покрываемых неисправностей). Способ внесения избыточности определяется на основании анализа структуры исходного объекта и возможностей ее модификации. При этом избыточность можно вносить на различных уровнях реализации: диверсифицировать элементы функционального базиса, целых блоков и подсистем, а также применять помехозащищенное или помехоустойчивое кодирование на этапе синтеза.

Известные способы внесения структурной, информационной и временной избыточности [9] связаны с использованием избыточного кодирования на различных уровнях реализации устройств.

Среди всего многообразия обратим внимание на класс кодов с суммированием [5, 6], которые удобно реализовывать в современных цифровых устройствах [10]. Данные коды являются разделимыми, т.е. в их кодовых словах можно выделить информационные и контрольные разряды; значения контрольных разрядов кодовых слов вычисляются с применением операций суммирования. Сами кодеры таких кодов строятся с применением сумматоров, реализуемых на любой элементной базе [11]. Простота формирования кодовых слов кодов с суммированием, низкая вносимая структурная избыточность, глубоко проработанные методы синтеза устройств с применением кодов с суммированием определяют их широкую применимость в современных цифровых устройствах [1—8].

Наиболее известным кодом с суммированием является код Бергера [12]. В его контрольных разрядах записывается двоичное число, равное числу нулевых информационных разрядов. Часто, однако, при построении кода Бергера суммируют число единичных разрядов, что проще реализуется аппаратно или программно. Коды Бергера не обнаруживают ошибки в информационных векторах, при которых искажается одинаковое число нулевых и единичных разрядов (такие ошибки называются симметричными [13]). Другие виды ошибок (монотонные и асимметричные*) ими обнаруживаются. Указанное свойство применяется при синтезе самопроверяемых и отказоустойчивых цифровых вычислительных устройств [5, 7, 14, 15].

К настоящему моменту предложено множество способов построения кодов с суммированием. Например, при формировании контрольных векторов подсчитывается суммарное

* Монотонные ошибки связаны с искажениями только нулевых или только единичных разрядов. Асимметричные ошибки возникают при неравном количестве искажений нулевых и единичных разрядов. Можно считать монотонные ошибки ошибками с крайней степенью асимметричности.

число единиц в кольце вычетов по заданному модулю $M \in \{2, 3, \dots, m+1\}$, где m — число информационных разрядов [16]. Данные коды, так же как и коды Бергера, не обнаруживают все симметричные ошибки. Кроме того, они не обнаруживают некоторую долю монотонных и асимметричных ошибок. Доля необнаруживаемых монотонных и асимметричных ошибок определяется значением модуля M и количеством информационных разрядов.

В фундаментальной работе [12] предложен способ построения кода с суммированием, основанный на предварительном взвешивании разрядов информационного вектора, после которого весовые коэффициенты значащих разрядов суммируются. В этой работе предложено приписывать информационным разрядам весовые коэффициенты из натурального ряда, за исключением степеней числа 2: $[w_i] = [3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, \dots]$, $i = \overline{1, m}$. Такие коды обнаруживают любые монотонные ошибки в информационных векторах, а также любые одно- и двукратные ошибки в информационных векторах. В [17] тот же автор предлагает применять при построении кода чередующиеся последовательности из весовых коэффициентов, образующих ряд возрастающих степеней числа 2: $[w_i] = [1, 2, 4, 8, \dots]$, $i = \overline{1, q}$, $q \in \{1, 2, \dots, m\}$. Такой код обнаруживает такие ошибки, которые связаны с искажениями q идущих подряд разрядов (пачки).

Для решения задач технической диагностики и синтеза цифровых устройств применяются различные способы кодирования [18—21]. Например, в [22] применено взвешивание произвольными весовыми коэффициентами с учетом характеристик возникающих ошибок на выходах исходного устройства. Так как взвешивание разрядов приводит к росту избыточности самого кода, эффективно использовать модулярную арифметику при построении кода с суммированием. Модульные взвешенные коды описаны в [23]. Известны работы, в которых исследуются обладающие избыточностью классических кодов Бергера коды с суммированием с последовательностью весовых коэффициентов, образующей ряд натуральных чисел [24, 25]. В [26] авторами исследуются способы построения взвешенных кодов с суммированием без использования операции переноса. В [27], к примеру, описано применение двух последовательностей весовых коэффициентов, натурального ряда и степеней числа 2 для построения кода с суммированием (в этой работе, однако, весовой коэффициент приписывается сразу же паре разрядов, следующих один за другим в информационном векторе).

Целью настоящей работы является исследование характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах такими кодами с суммированием, при построении которых используются различные установленные последовательности весовых коэффициентов и счет по заданному модулю M . Рассматриваемый класс кодов ни в отечественной, ни в зарубежной литературе досконально не исследован. Отдельно описаны некоторые модульные взвешенные коды с суммированием с произвольными весовыми коэффициентами разрядов [28, 29]. Настоящую работу можно считать продолжением данных исследований.

Особенности обнаружения ошибок кодами с суммированием с установленными последовательностями весовых коэффициентов.

Общие замечания. Рассмотрим коды с суммированием, которые строятся по следующим принципам:

- 1) устанавливается последовательность весовых коэффициентов $[w_i]$, $i = \overline{1, m}$;
- 2) фиксируется модуль $M \in \{2, 3, \dots, m+1\}$;
- 3) суммируются весовые коэффициенты значащих разрядов информационного вектора;
- 4) полученное число записывается в $k = \lceil \log_2 M \rceil$ разрядах контрольного вектора.

Будем рассматривать коды с суммированием, для которых выбираются следующие последовательности. Первый тип кода образуется с применением последовательности $[w_i] = [1, 2, 3, \dots]$, $i = \overline{1, m}$, обозначим его через W^1M_m -код. Второй тип кода образуется с применением последовательности $[w_i] = [3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, \dots]$, $i = \overline{1, m}$, обозначим его через W^2M_m -код. Третий тип образуется с применением чередующихся последовательностей степеней числа 2 $[w_i] = [1, 2, 4, 8, \dots]$, $i = \overline{1, q}$. При этом задается q — число различных членов последовательности степеней числа 2, например, $q=3$ означает, что чередуются последовательности $[w_i] = [1, 2, 4]$. Данный код обозначим через qW^3M_m .

В [29] предложен способ подсчета числа не обнаруживаемых в информационных векторах модульных взвешенных кодов с суммированием ошибок. Этот способ может быть применен и при подсчете общего числа ошибок, не обнаруживаемых введенными в рассмотрение W^1M_m -, W^2M_m - и qW^3M_m -кодами. Она, однако, не позволяет подсчитывать общее число обнаруживаемых ошибок по кратностям и видам. Характеристики обнаружения ошибок в информационных векторах разделимыми кодами определяют и ключевые показатели обнаружения ошибок на выходах блоков и подсистем цифровых устройств [5, 6].

В ходе исследований характеристик обнаружения ошибок W^1M_m -, W^2M_m - и qW^3M_m -кодами создано специальное программное обеспечение для работы алгоритмов формирования кодовых слов и подсчета ошибок по видам и кратностям, которое позволило получить количественную оценку числа необнаруживаемых ошибок в информационных векторах каждого из кодов с различными модулями M . Приведем некоторые результаты исследований. Число информационных разрядов ограничим диапазоном $m=4—16$. Это объясняется большой разрядностью чисел, характеризующих необнаруживаемые ошибки. Модуль выбирался из диапазона $M=2—10$. Основные закономерности улавливаются уже на этих диапазонах значений m и M .

Коды с весовыми коэффициентами из последовательности, образующей натуральный ряд. Особенность W^1M_m -кода связана с используемыми операциями сложения весовых коэффициентов в кольце вычетов по заданному модулю [28].

Утверждение 1. Если значение какого-либо весового коэффициента разряда w_i , $i = \overline{1, m}$, кратно значению модуля M , то данный разряд не проверяется в контрольном векторе.

Положим, $w_i=M$. Тогда, если разряд $f_i=0$, к суммарному значению веса информационного вектора не прибавляется ничего. Если $f_i=1$, то также ничего не прибавляется, так как $w_i(\text{mod } M)=M(\text{mod } M)=0$.

Второе утверждение следует из того, что ряд весовых коэффициентов включает в себя числа $1, 2, 3, \dots, m$.

Утверждение 2. W^1M_m -код будет помехозащищенным в том, и только в том случае, если он строится при условиях $M>m$.

Положение утверждения 2 определяет условия построения помехозащищенного W^1M_m -кода. Исходя из этого в табл. 1 представлены минимальные и максимальные значения модулей для каждого значения m (M_{\min} и M_{\max}), k — произвольное натуральное число, большее 2. Значение M_{\max} определяется максимальным суммарным значением весовых коэффициентов разрядов $W_{\max} = \sum_{i=1}^m w_i : M_{\max}=W_{\max}+1$. В последнем столбце таблицы приведено число помехозащищенных W^1M_m -кодов для каждого m . С ростом числа m количество помехозащищенных W^1M_m -кодов также растет.

Таблица 1
Зависимость числа помехозащищенных W^1M_m -кодов
от значения m

m	W_{\max}	M_{\min}	M_{\max}	$N(W^1M_m)$
2	3	3	4	2
3	6	4	7	4
4	10	5	11	7
5	15	6	16	11
6	21	7	22	16
7	28	8	29	22
8	36	9	37	29
9	45	10	46	37
10	55	11	56	46
11	66	12	67	56
12	78	13	79	67
13	91	14	92	79
14	105	15	106	92
15	120	16	121	106
16	136	17	137	121
...
k	$\sum_{i=1}^k w_i$	$k+1$	$\sum_{i=1}^k w_i + 1$	$\sum_{i=1}^k w_i - k + 1$

В табл. 2 дана характеристика не обнаруживаемых некоторыми W^1M_m -кодами ошибок в информационных векторах. Приведены данные для необнаруживаемых ошибок различных видов (N_v — число монотонных, N_σ — симметричных, N_α — асимметричных ошибок), а также общее число ошибок N_m . В последних трех столбцах приведены доли монотонных v , симметричных σ и асимметричных α ошибок от общего количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах.

Таблица 2
Характеристика необнаруживаемых W^1M_m -кодами ошибок по видам

m	N_m	N_v	N_σ	N_α	$v, \%$	$\sigma, \%$	$\alpha, \%$
$M=5$							
4	36	18	2	16	50	5,556	44,444
$M=6$							
4	28	12	2	14	42,857	7,143	50
5	140	52	16	72	37,143	11,429	51,429
$M=7$							
4	22	12	2	8	54,545	9,091	36,364
5	116	44	12	60	37,931	10,345	51,724
6	522	154	74	294	29,502	14,176	56,322
$M=8$							
4	16	4	2	10	25	12,5	62,5
5	96	32	12	52	33,333	12,5	54,167
6	448	116	64	268	25,893	14,286	59,821
7	1920	420	312	1188	21,875	16,25	61,875
$M=9$							
4	14	4	2	8	28,571	14,286	57,143
5	84	32	12	40	38,095	14,286	47,619
6	396	124	58	214	31,313	14,646	54,04
7	1698	404	268	1026	23,793	15,783	60,424
8	7030	1282	1184	4564	18,236	16,842	64,922

Продолжение таблицы

m	N_m	N_ν	N_σ	N_α	$\nu, \%$	$\sigma, \%$	$\alpha, \%$
$M=10$							
4	12	2	2	8	16,667	16,667	66,667
5	72	20	12	40	27,778	16,667	55,556
6	348	92	56	200	26,437	16,092	57,471
7	1512	328	244	940	21,693	16,138	62,169
8	6300	1076	1054	4170	17,079	16,73	66,19
9	25704	3492	4372	17840	13,585	17,009	69,406

Наиболее существенную долю в классе необнаруживаемых составляют асимметричные ошибки. Практически для всех W^1M_m -кодов (за малым исключением) величина α превышает 50 %. Наименьшую долю практически для всех W^1M_m -кодов составляют симметричные ошибки — их не более 18 % от общего числа необнаруживаемых ошибок. Доля монотонных ошибок в классе необнаруживаемых сильно варьирует от чуть более 13 до чуть менее 55 %.

Для $M < 8$ с увеличением m уменьшается доля монотонных ошибок, а доля симметричных и асимметричных ошибок возрастает. Для кодов с $M \geq 8$ наблюдается сначала рост доли монотонных ошибок со смещением максимума в сторону увеличения значения m при увеличении M , а затем уменьшение. Строго наоборот ведут себя асимметричные ошибки. Доля симметричных ошибок с ростом m для заданного M незначительно увеличивается.

Может быть проведен и более детальный анализ характеристик обнаружения ошибок W^1M_m -кодами.

Коды с весовыми коэффициентами из последовательности, образующей натуральный ряд с исключением степеней числа 2. Весовые коэффициенты W^2M_m -кодов выбираются из ряда 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, ... Данный ряд рассмотрен в работе [17], в ней использовано суммирование в кольце вычетов по максимальному модулю $M_{\max} = W_{\max} + 1$. Получается код с высокой избыточностью, обладающий возможностями обнаружения любых монотонных ошибок и любых одно- и двукратных ошибок в информационных векторах. Уменьшение значения модуля при построении такого кода с суммированием приводит к следующему.

Утверждение 3. Помехозащищенные W^2M_m -коды могут быть построены только при выборе значения модуля из множества $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$.

Справедливость утверждения 3 следует из принципов построения W^2M_m -кода. В ряде 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, ... отсутствуют степени числа 2. Другие значения в нем присутствуют. Это означает, что для любого модуля $M \notin \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$ неизбежно появление значения весового коэффициента, равного и кратного модулю.

Утверждение 4. Среди W^2M_m -кодов с модулями $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$ помехозащищенными будут коды с длиной информационного вектора, не превышающей длины для граничного случая, когда появляется весовой коэффициент, кратный значению модуля.

В самом деле, если $w_i = aM$, то $w_i \pmod{M} = aM \pmod{M} = 0$.

Определим для некоторых модулей $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$ граничные значения w_i .

При $M=4$ первым весовым коэффициентом, кратным ему, является $w_i=12$. Это весовой коэффициент восьмого разряда информационного вектора. При $M=8$ это $w_i=24$ — весовой коэффициент девятнадцатого разряда информационного вектора. При $M=16$ граничное значение $w_i=48$, при $M=32$ — $w_i=96$. Этот ряд можно продолжать.

Утверждение 5. Граничное значение весового коэффициента, по достижении которого теряется свойство помехозащищенности, для W^2M_m -кодов с модулями $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$ равно $3M$.

Отсюда следует такое положение.

Утверждение 6. W^2M_m -код с модулями $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$ будет помехозащищенным, если он строится для длины информационного вектора $m < 3M - \lceil \log_2 3M \rceil$.

Вычитаемая величина $\lceil \log_2 3M \rceil$ определена таким образом. Все степени числа 2 исключены из ряда, приписываемого разрядам информационного вектора. Таким образом, должно быть исключено столько разрядов из вектора, сколько исключено степеней числа 2 из ряда весовых коэффициентов.

В табл. 3 приводятся рассчитанные значения, характеризующие обнаружение ошибок W^2M_m -кодами по видам. Из анализа данных следует, что доля монотонных ошибок в классе не обнаруживаемых W^2M_m -кодами уменьшается с ростом m , при этом доля асимметричных ошибок увеличивается. Доля симметричных ошибок незначительно возрастает при росте m , а затем начинает также незначительно уменьшаться. Подавляющее большинство не обнаруживаемых W^2M_m -кодами ошибок являются асимметричными.

Таблица 3

Характеристика не обнаруживаемых W^2M_m -кодами ошибок по видам

m	N_m	N_0	N_σ	N_α	$v, \%$	$\sigma, \%$	$\alpha, \%$
$M=4$							
4	48	20	8	20	41,667	16,667	41,667
5	224	84	44	96	37,5	19,643	42,857
6	960	266	196	498	27,708	20,417	51,875
7	3968	892	792	2284	22,48	19,96	57,56
$M=8$							
4	20	12	0	8	60	0	40
5	100	44	8	48	44	8	48
6	456	154	68	234	33,772	14,912	51,316
7	1936	488	336	1112	25,207	17,355	57,438
8	7936	1380	1376	5180	17,389	17,339	65,272
9	32256	4516	5620	22120	14	17,423	68,576
10	130048	13772	22170	94106	10,59	17,048	72,363
11	522240	42116	86292	393832	8,064	16,523	75,412
12	2093056	128516	334224	1630316	6,14	15,968	77,892
13	8380416	390420	1292424	6697572	4,659	15,422	79,919
14	33538048	1179360	4999408	27359280	3,516	14,907	81,577
15	134184960	3541948	19358480	111284532	2,64	14,427	82,934
16	536805376	10680978	75073302	451051096	1,99	13,985	84,025

В заключение необходимо добавить, что помехозащищенные W^2M_m -коды, так же как и W^1M_m -коды, не относятся к кодам с обнаружением любых двукратных ошибок.

Коды с весовыми коэффициентами из последовательности повторяющихся степеней числа 2. Отдельный интерес представляет изучение особенностей обнаружения ошибок в информационных векторах qW^2M_m -кодами, при построении которых используются повторяющиеся последовательности степеней числа 2. В ходе исследований были рассмотрены последовательности $[1, 2]$ ($q=2$), $[1, 2, 4]$ ($q=3$), $[1, 2, 4, 8]$ ($q=4$), $[1, 2, 4, 8, 16]$ ($q=5$), а также последовательность $[1, 2, \dots, 2^m]$ ($q=m$).

Следуя утверждению 1, отметим, что для qW^3M_m -кодов характерна такая зависимость.

Утверждение 7. qW^3M_m -код будет помехозащищенным, если

- а) модуль $M \notin \left\{ 2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$;
- б) значение $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$ и $M > 2^{q-1}$.

В самом деле, если не использовать в качестве модуля степень числа 2, то ни один из весовых коэффициентов не окажется кратным по величине модулю. Если в качестве модуля взять степень числа 2, превышающую максимальное значение весового коэффициента, это также позволит контролировать вычисления в соответствующем ему разряде.

Таким образом, из формулировки утверждения 7 непосредственно следует, что на диапазоне модулей $M=2—10$ помехозащищенными будут только коды:

- при $q=2$ — со значениями модулей $M \in \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$;
- при $q=3$ — с $M \in \{3, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$;
- при $q=4, q=5$ и $q=m$ — с $M \in \{3, 5, 6, 7, 9, 10\}$.

Анализ характеристических таблиц для qW^3M_m -кодов показал важную особенность обнаружения ими монотонных ошибок в информационных векторах. В табл. 4 приведены значения модулей, при которых qW^3M_m -коды обнаруживают любые монотонные ошибки до кратности d_v , включительно. Обнаружение монотонных ошибок qW^3M_m -кодами, в особенности кодами с $q=2$, может быть использовано при контроле вычислений на выходах цифровых устройств с выделением групп независимых и монотонно независимых выходов, либо с преобразованием структур исходных устройств в структуры с контролепригодными по qW^3M_m -кодам выходами. Особенности выделения групп независимых и монотонно независимых выходов рассмотрены в работах [2, 7, 30—32].

Таблица 4

Условия обнаружения монотонных ошибок qW^3M_m -кодами

d_v	q		
	2	3	4, 5, m
1	$M = 3, 4$	$M = 3, 5, 6, 8$	$M = 3, 5, 6, 9, 10$
2	$M = 5, 6$	$M = 7, 9, 10$	$M = 7$
3	$M = 7, 8$	—	—
4	$M = 9, 10$	—	—

Ввиду того что число помехозащищенных qW^3M_m -кодов по сравнению с рассмотренными выше W^1M_m - и W^2M_m -кодами велико (для рассмотренного диапазона модулей это 27 вариантов со значениями $m=4—16$), характеристические таблицы в настоящей статье не приводятся.

Результаты экспериментов с контрольными комбинационными схемами. В ходе исследований проведены эксперименты по использованию рассматриваемых кодов для обнаружения ошибок на выходах контрольных комбинационных схем. Рассматривались схемы из известного пакета LG'89 [33, 34], представленные, в том числе, в формате *.netblif. Этот формат описывает структуру схемы в виде логических элементов и связей между ними, входами и выходами самой схемы. Эксперимент состоял в моделировании работы схемы в исправном состоянии и при воздействии всех одиночных константных неисправностей выходов логических элементов. В схему вносилась последовательно каждая константная неисправность. Затем на входы последовательно подавались все входные комбинации, фиксировалась реакция на выходах схемы в виде ошибки в выходном векторе, а также возможность ее идентификации с помощью различных W^1M_m -, W^2M_m - и qW^3M_m -кодов. Для множества контрольных схем были получены характеристические таблицы, включающие детальную информа-

цию о видах и кратностях ошибок, не обнаруженных в выходном векторе. Схема „alu2“ снабжена десятью входами и шестью выходами, в пакете LG'89 в формате *.netblif она реализована на 360 логических элементах типа NOR (ИЛИ-НЕ) с одним—четырьмя выходами.

В табл. 5 сведены рассчитанные абсолютные показатели обнаружения ошибок на выходах схемы „alu2“. В ней представлено общее количество необнаруживаемых ошибок (N^*_m), а также их распределения по кратностям ($d=1—6$) и видам (N^*_v — монотонные, N^*_σ — симметричные, N^*_α — асимметричные), N — общее число ошибок на выходах схемы. Таблицу 5 дополняет табл. 6, где приведены относительные показатели обнаружения ошибок на выходах схем. В каждой клетке таблицы приведены значения долей числа необнаруживаемых ошибок данной кратности/вида от общего числа ошибок, которые возникают на выходах схемы.

Таблица 5

Результаты экспериментов по обнаружению ошибок на выходах „alu2“
 W^1M_m - и W^2M_m -кодами (абсолютные величины)

M	Необнаруживаемые ошибки по кратностям						Необнаруживаемые ошибки по видам			N^*_m
	1	2	3	4	5	6	N^*_v	N^*_σ	N^*_α	
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 3, 4, 5, 6]										
2	23167	1401	606	168	0	0	24103	1011	228	25342
3	16105	4240	2441	43	2	0	16365	4123	2343	22831
4	1102	1360	475	92	0	0	1894	1008	127	3029
5	21845	1175	151	67	24	0	23057	73	132	23262
6	16105	41	174	15	0	0	16257	8	70	16335
7	0	1375	87	11	0	0	1384	8	81	1473
8	0	380	364	61	0	0	681	28	96	805
Последовательность весовых коэффициентов [3, 5, 6, 7, 9, 10]										
2	16105	6313	3540	47	44	0	19401	4171	2477	26049
3	23257	426	895	64	24	0	24445	5	216	24666
4	0	4240	1141	3	38	0	1141	4118	163	5422
5	22065	2465	6	120	18	0	23683	975	16	24674
6	0	46	875	11	24	0	780	5	171	956
7	1102	975	2102	87	0	0	2031	65	2170	4266
8	0	84	1023	0	0	0	1100	0	7	1107
N	46424	12347	3707	316	44	0	52460	7722	2656	62838

Таблица 6

Результаты экспериментов по обнаружению ошибок на выходах „alu2“
 W^1M_m - и W^2M_m -кодами (относительные величины)

M	$\beta_{ds}, \%$					$v^*, \%$	$\sigma^*, \%$	$\alpha^*, \%$	$\gamma^*, \%$
	1	2	3	4	5				
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 3, 4, 5, 6]									
2	49,903	11,347	16,347	53,165	0	45,945	13,092	8,584	40,329
3	34,691	34,34	65,848	13,608	4,545	31,195	53,393	88,215	36,333
4	2,374	11,015	12,814	29,114	0	3,61	13,054	4,782	4,82
5	47,055	9,516	4,073	21,203	54,545	43,952	0,945	4,97	37,019
6	34,691	0,332	4,694	4,747	0	30,989	0,104	2,636	25,995
7	0	11,136	2,347	3,481	0	2,638	0,104	3,05	2,344
8	0	3,078	9,819	19,304	0	1,298	0,363	3,614	1,281
Последовательность весовых коэффициентов [3, 5, 6, 7, 9, 10]									
2	34,691	51,13	95,495	14,873	100	36,982	54,015	93,261	41,454
3	50,097	3,45	24,144	20,253	54,545	46,597	0,065	8,133	39,253
4	0	34,34	30,78	0,949	86,364	2,175	53,328	6,137	8,629
5	47,529	19,964	0,162	37,975	40,909	45,145	12,626	0,602	39,266
6	0	0,373	23,604	3,481	54,545	1,487	0,065	6,438	1,521
7	2,374	7,897	56,704	27,532	0	3,872	0,842	81,702	6,789
8	0	0,68	27,596	0	0	2,097	0	0,264	1,762

Из табл. 6 следует, что все одиночные ошибки на выходах схемы „alu2“ обнаруживаются только W^1M_m -кодами со значениями модуля $M=7$ и 8 , и только W^2M_m -кодами со значениями модуля $M=4, 6$ и 8 . Наихудшими характеристиками обладают взвешенные коды с суммированием при $M=2$. Они не обнаружили 40—42 % ошибок на выходах „alu2“. Оба кода наихудшим образом справляются именно с монотонными ошибками. При этом следует учесть, что данные коды имеют всего по одному контрольному разряду. Коды с двумя контрольными разрядами (с $M=3$ и 4) обнаруживают большее количество ошибок на выходах схемы. Коды с $M=3$ не существенно отличаются от кодов с $M=2$. Коды с $M=4$ обнаруживают на порядок больше ошибок. К примеру, для W^1M_m -кода с $M=4$ показатель $\gamma^*=4,82$ %, а для W^2M_m -кода с $M=4$ — $\gamma^*=8,629$ %. W^2M_m -код при этом обнаружил все одиночные ошибки, а W^1M_m -код некоторые из них не обнаружил. W^1M_m -коды с $M=5$ и 6 также имеют низкие показатели обнаружения ошибок. W^1M_m -коды при $M=7$ и 8 не обнаружили соответственно $\gamma^*=2,344$ и $1,281$ % ошибок на выходах „alu2“. W^1M_m -код при $M=8$ обнаруживает все одиночные ошибки, а также большинство двукратных ошибок (около 97 %). W^2M_m -код при $M=6—8$ обнаружил свыше 90 % ошибок на выходах „alu2“. При этом наименьший процент ошибок дал именно код с $M=6$. Для него $\gamma^*=1,521$ %. Данный код „хорошо справился“ с обнаружением ошибок малых кратностей, а также монотонных ошибок на выходах „alu2“.

В табл. 7 и 8 дана характеристика не обнаруживаемых qW^3M_m -кодами ошибок на выходах „alu2“. Наилучшими способностями к обнаружению обладают коды при $q=2$ и $M \geq 6$, ими обнаруживается свыше 98 % ошибок на выходах рассматриваемой схемы. По данным таблиц видно, как с ростом M уменьшается общее число необнаруживаемых монотонных ошибок, что связано с улучшением свойств обнаружения монотонных ошибок в области малой их кратности при росте M . В отличие от кодов с $q > 2$, рассматриваемые qW^3M_m -коды за счет лучшей обнаруживающей способности в части монотонных ошибок обнаруживают меньшее количество ошибок на выходах „alu2“.

Также можно обратить внимание на то, что коды при $q=2$ и $M=2, q=3$ и $M=2, 4, q=4, 5, 6$ и $M=2, 4, 8$ не обнаруживают некоторую долю одиночных ошибок на выходах схемы, что согласуется с утверждением 7. При этом чем больше значение q , тем больше доля необнаруживаемых ошибок от общего числа одиночных ошибок.

Среди помехозащищенных qW^3M_m -кодов наилучшими по обнаружению ошибок в области малой их кратности характеристиками обладают коды с $q=2$. Например, эти коды с $M=5—8$ не обнаруживают чуть менее 8 % двукратных ошибок. Соизмеримы с этим показателем свойства qW^3M_m -кодов с $q=4$ при $M=5, 7$ и с $q=6$ при $M=5$. Для других кодов эта величина значительно больше. Обращая внимание на столбец γ^* , заметим, что среди выделенных кодов находятся и коды с наилучшими характеристиками обнаружения ошибок в общем для своего значения q .

Таблица 7

Результаты экспериментов по обнаружению ошибок на выходах „alu2“ qW^3M_m -кодами (абсолютные величины)

M	Необнаруживаемые ошибки по кратностям						Необнаруживаемые ошибки по видам			N* _m
	1	2	3	4	5	6	N* _v	N* _σ	N* _α	
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 1, 2, 1, 2]										
2	23167	1401	606	168	0	0	24103	1011	228	25342
3	0	5215	179	81	16	0	4257	1011	223	5491
4	0	1368	520	73	0	0	881	1011	69	1961
5	0	980	770	151	22	0	863	1011	49	1923
6	0	980	27	53	0	0	22	1011	27	1060
7	0	980	27	31	2	0	2	1011	27	1040
8	0	980	27	31	0	0	0	1011	27	1038

Продолжение таблицы

M	Необнаруживаемые ошибки по кратностям						Необнаруживаемые ошибки по видам			N* _m
	1	2	3	4	5	6	N* _v	N* _σ	N* _α	
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 4, 1, 2, 4]										
2	43910	11639	3447	214	44	0	49220	7576	2458	59254
3	0	6351	468	23	38	0	2475	4200	205	6880
4	16105	5025	3146	167	0	0	17956	4115	2372	24443
5	0	4580	110	64	2	0	467	4115	174	4756
6	0	6161	411	0	38	0	2347	4115	148	6610
7	0	4115	243	7	0	0	133	4115	117	4365
8	0	4115	825	139	0	0	854	4115	110	5079
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 4, 8, 1, 2]										
2	23167	1703	182	254	44	0	24119	1003	228	25350
3	0	5215	179	81	16	0	4257	1011	223	5491
4	1102	1662	67	90	18	0	1790	1000	149	2939
5	0	988	829	53	4	0	826	1000	48	1874
6	0	1282	27	51	16	0	302	1003	71	1376
7	0	1028	67	140	22	0	142	1048	67	1257
8	1102	980	63	53	2	0	1104	1000	96	2200
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 4, 8, 16, 1]										
2	28907	5695	254	102	0	0	30510	4256	192	34958
3	0	5339	2121	70	16	0	2812	2564	2170	7546
4	22947	499	179	32	0	0	23440	113	104	23657
5	0	2561	2190	33	4	0	111	2553	2124	4788
6	0	1361	25	20	0	0	1303	73	30	1406
7	0	4180	178	20	0	0	129	4200	49	4378
8	22947	197	34	30	0	0	23031	113	64	23208
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 4, 8, 16, 32]										
2	45012	10971	3228	43	0	0	49209	7629	2416	59254
3	0	5215	179	81	16	0	4257	1011	223	5491
4	39052	5583	145	0	0	0	42211	2531	38	44780
5	0	988	829	53	4	0	826	1000	48	1874
6	0	3937	152	11	0	0	2965	983	152	4100
7	0	4115	243	7	0	0	133	4115	117	4365
8	39052	4281	0	0	0	0	40802	2531	0	43333
N	46424	12347	3707	316	44	0	52460	7722	2656	62838

Таблица 8

Результаты экспериментов по обнаружению ошибок на выходах „alu2“
 qW^3M_m -кодами (относительные величины)

M	$\beta_d, \%$					$v^*, \%$	$\sigma^*, \%$	$\alpha^*, \%$	$\gamma^*, \%$
	1	2	3	4	5				
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 1, 2, 1, 2]									
2	49,903	11,347	16,347	53,165	0	45,945	13,092	8,584	40,329
3	0	42,237	4,829	25,633	36,364	8,115	13,092	8,396	8,738
4	0	11,08	14,028	23,101	0	1,679	13,092	2,598	3,121
5	0	7,937	20,772	47,785	50	1,645	13,092	1,845	3,06
6	0	7,937	0,728	16,772	0	0,042	13,092	1,017	1,687
7	0	7,937	0,728	9,81	4,545	0,004	13,092	1,017	1,655
8	0	7,937	0,728	9,81	0	0	13,092	1,017	1,652

Продолжение таблицы

M	$\beta_{ds}, \%$					$\nu^*, \%$	$\sigma^*, \%$	$\alpha^*, \%$	$\gamma^*, \%$
	1	2	3	4	5				
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 4, 8, 1, 2]									
2	49,903	13,793	4,91	80,38	100	45,976	12,989	8,584	40,342
3	0	42,237	4,829	25,633	36,364	8,115	13,092	8,396	8,738
4	2,374	13,461	1,807	28,481	40,909	3,412	12,95	5,61	4,677
5	0	8,002	22,363	16,772	9,091	1,575	12,95	1,807	2,982
6	0	10,383	0,728	16,139	36,364	0,576	12,989	2,673	2,19
7	0	8,326	1,807	44,304	50	0,271	13,572	2,523	2
8	2,374	7,937	1,699	16,772	4,545	2,104	12,95	3,614	3,501
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 4, 8, 16, 1]									
2	62,267	46,125	6,852	32,278	0	58,159	55,115	7,229	55,632
3	0	43,241	57,216	22,152	36,364	5,36	33,204	81,702	12,009
4	49,429	4,041	4,829	10,127	0	44,682	1,463	3,916	37,648
5	0	20,742	59,077	10,443	9,091	0,212	33,061	79,97	7,62
6	0	11,023	0,674	6,329	0	2,484	0,945	1,13	2,237
7	0	33,854	4,802	6,329	0	0,246	54,39	1,845	6,967
8	49,429	1,596	0,917	9,494	0	43,902	1,463	2,41	36,933
Последовательность весовых коэффициентов [1, 2, 4, 8, 16, 32]									
2	96,958	88,856	87,079	13,608	0	93,803	98,796	90,964	94,296
3	0	42,237	4,829	25,633	36,364	8,115	13,092	8,396	8,738
4	84,12	45,217	3,912	0	0	80,463	32,776	1,431	71,263
5	0	8,002	22,363	16,772	9,091	1,575	12,95	1,807	2,982
6	0	31,886	4,1	3,481	0	5,652	12,73	5,723	6,525
7	0	33,328	6,555	2,215	0	0,254	53,289	4,405	6,946
8	84,12	34,672	0	0	0	77,777	32,776	0	68,96

Необходимо заметить, что эксперимент ограничен значением модуля при построении кода $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$, не брались модули с большими значениями — до $M_{\max} = W_{\max} + 1$, поскольку, во-первых, коды бы имели существенную избыточность, тогда как в рассматриваемом примере все коды имеют от одного до трех контрольных разрядов, а, во-вторых — основные закономерности для рассматриваемых кодов подтверждаются и на выбранном диапазоне модулей.

Заключение. При построении модульного кода с суммированием могут использоваться заранее выбранные последовательности весовых коэффициентов. Однако существует ограничение на получение помехозащищенного модульного взвешенного кода с суммированием. Если один из весовых коэффициентов кратен значению модуля, то код не сможет обнаружить ошибку разряда, к которому такой коэффициент приписан. Именно поэтому не для любого значения m и M может быть построен помехозащищенный взвешенный код с суммированием.

В представленной статье установлены особенности обнаружения ошибок модульными взвешенными кодами с суммированием с двумя последовательностями весовых коэффициентов. Приведены условия построения помехозащищенных кодов. В случае выбора последовательности весовых коэффициентов в виде натурального ряда помехозащищенный код может быть построен при условии $M > m$ (см. утверждение 2). В случае выбора последовательности весовых коэффициентов в виде натурального ряда за исключением степеней числа 2 помехозащищенный код строится для модулей $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \rceil} \right\}$ при $m < 3M - \lceil \log_2 3M \rceil$ (см. утверждения 3 и 6). Помехозащищенные qW^3M_m -коды строятся при

модулю, соответствующем условию $M \notin \left\{ 2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$, либо при $M \in \left\{ 2^2, 2^3, \dots, 2^{\left\lceil \log_2 \left(\sum_{i=1}^m w_i + 1 \right) \right\rceil} \right\}$ и $M > 2^{q-1}$.

В статье приведены особенности обнаружения ошибок в информационных векторах данными кодами, а также обоснования основных положений об их обнаруживающих способностях.

Существует два способа построения помехозащищенных модульных взвешенных кодов. Первый состоит в выборе последовательности весовых коэффициентов, ни один из которых не будет кратен значению модуля. Второй способ связан с дополнительным контролем тех разрядов, весовые коэффициенты которых кратны модулю. Такой дополнительный контроль можно осуществлять с помощью всего одной функции — паритета данных разрядов. Может осуществляться и контроль по тому же принципу суммирования значений разрядов или вновь установленных коэффициентов разрядов в кольце вычетов по выбранному модулю. Это, однако, приведет к увеличению избыточности кода.

Рассмотренные в статье коды могут эффективно применяться при синтезе цифровых вычислительных устройств и систем. При этом необходимо учитывать особенности обнаружения ими ошибок в информационных векторах. В дальнейшем могут быть проработаны методы поиска групп контролепригодных выходов для таких кодов по аналогии с тем, как это сделано в работах [4—6].

Модульные взвешенные коды с суммированием с установленными последовательностями весовых коэффициентов представляют собой перспективный класс кодов с суммированием, пригодных для построения самопроверяемых и отказоустойчивых цифровых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006. 720 p.
2. 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.
3. Дрозд А. В., Харченко В. С., Антощук С. Г., Дрозд Ю. В., Дрозд М. А., Сулима Ю. Ю. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / Под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского „ХАИ“, 2012. 614 с.
4. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств. СПб: Наука, 2018. 151 с.
5. 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.
6. 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.
7. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
8. Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем. СПб: СПИИРАН, 1992. 234 с.
9. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Основы теории надежности и технической диагностики. СПб: Лань, 2019. 588 с.
10. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. 111 p.
11. Harris D. M., Harris S. L. Digital Design and Computer Architecture. Morgan Kaufmann, 2012. 569 p.

12. *Berger J. M.* A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels // *Information and Control*. 1961. Vol. 4, is. 1. P. 68—73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
13. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58, № 5. С. 333—343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
14. *Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A.* Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead // *VLSI Design*. 2000. Vol. 11, is. 1. P. 47—58. DOI: 10.1155/2000/46578.
15. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // *Автоматика и телемеханика*. 2010. № 6. С. 155—162.
16. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D.* Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems // *Proc. of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*. Batumi, Georgia, 26—29 September 2015. P. 181—187. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493133.
17. *Berger J. M.* A Note on Burst Detection Sum Codes // *Information and Control*. 1961. Vol. 4, is. 2—3. P. 297—299. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
18. *Ostanin S.* Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults // *Proc. of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 696—699. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
19. *Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A.* R-Code for Concurrent Error Detection and Correction in the Logic Circuits // *2018 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 29 January—1 February 2018, Moscow, Russia. P. 1430—1433. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
20. *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 Symposium (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, 29 September—2 October 2017. P. 25—28. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
21. *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 Symposium (EWDTS'2021)*. Batumi, Georgia, 10—13 September 2021. P. 355—360. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581027.
22. *Das D., Touba N. A.* Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits // *Proc. of 17th IEEE Test Symposium*. California, USA, 1999. P. 370—376. DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
23. *Das D., Touba N. A., Seuring M., Gossel M.* Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes // *Proc. of the IEEE 6th Intern. On-Line Testing Workshop (IOLTW)*. Spain, Palma de Mallorca, 3—5 July 2000. P. 171—176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
24. *Mehov V., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Urganskov D.* Concurrent Error Detection Based on New Code with Modulo Weighted Transitions between Information Bits // *Proc. of 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'2007)*. Erevan, Armenia, 25—30 September 2007. P. 21—26.
25. *Мехов В. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием // *Автоматика и телемеханика*. 2008. № 8. С. 153—165.
26. *Bliudov A., Nazarov I., Dmitriev V., Kovalyov K.* Use of Systematic Code Based on Data Bits Weighing for Concurrent Error Detection Considering Error Structure Analysis // *Proc. of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*. Kazan, Russia, 14—17 September 2018. P. 443—449. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524722.
27. *Дмитриев В. В.* О двух способах взвешивания и их влиянии на свойства кодов с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля логических схем // *Изв. Петербургского университета путей сообщения*. 2015. № 3. С. 119—129.
28. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Коды с суммированием с фиксированными значениями кратностей обнаруживаемых монотонных и асимметричных ошибок для систем технического диагностирования // *Автоматика и телемеханика*. 2019. № 6. С. 121—141.

29. Efanov D. V., Pashukov A. V. The Weight-Based Sum Codes in the Residue Ring by Arbitrary Modulus for Synthesis of Self-Checking Digital Computing Systems // Proc. of 19th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2021). Batumi, Georgia, 10—13 September 2021. P. 170—179. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581032.
30. Sogomonyan E. S., Gössel M. Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. 1993. Vol. 4, is. 4. P. 267—281. DOI: 10.1007/BF00971975.
31. Гессель М., Морозов А. А., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Построение комбинационных самопроверяемых устройств с монотонно независимыми выходами // Автоматика и телемеханика. 1994. № 7. С. 148—160.
32. Morosow A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs // VLSI Design. 1998. Vol. 5, is. 4. P. 333—345. DOI: 10.1155/1998/20389.
33. Collection of Digital Design Benchmarks [Электронный ресурс]: <<http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>>.
34. Sentovich E. M., Singh K. J., Moon C., Savoj H., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization // Proc. IEEE Intern. Conf. on Computer Design: VLSI in Computers & Processors. 11—14 October 1992, Cambridge, MA, USA. P. 328—333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.

Сведения об авторах**Дмитрий Викторович Ефанов**

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

Артём Валерьевич Пащуков

— Российский университет транспорта, кафедра автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте; ассистент; E-mail: art_pash@mail.ru

Поступила в редакцию 04.11.21; одобрена после рецензирования 02.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Fujiwara E. *Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications*, John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
2. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*, Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
3. Drozd A.V., Kharchenko V.S., Antoshchuk S.G., Drozd Yu.V., Drozd M.A., Sulima Yu.Yu. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* (Working Diagnostics of Safe Information and Control Systems), Khar'kov, 2012, 614 p. (in Russ.)
4. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., 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.)
5. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., 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.)
6. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., 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.)
7. Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* (The Self-Checked Devices and Failure-Safe Systems), Moscow, 1989, 208 p. (in Russ.)
8. Mikoni S.V. *Obshchiye diagnosticheskiye bazy znaniy vychislitel'nykh sistem* (General Diagnostic Knowledge Bases of Computing Systems) St. Petersburg, 1992, 234 p. (in Russ.)
9. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki* (Fundamentals of the Theory of Reliability and Technical Diagnostics), St. Petersburg, 2019, 588 p. (in Russ.)
10. Piestrak S.J. *Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
11. Harris D.M., Harris S.L. *Digital Design and Computer Architecture*, Morgan Kaufmann, 2012, 569 p.
12. Berger J.M. *Information and Control*, 1961, no. 1(4), pp. 68—73, DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
13. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 5(58), pp. 333—343, DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
14. Matrosova A.Yu., Levin I., Ostanin S.A. *VLSI Design*, 2000, no. 1(11), pp. 47—58, DOI: 10.1155/2000/46578.

15. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Automation and Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 1117–1123.
16. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Efanov D. *Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, September 26–29, 2015, pp. 181–187, DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493133.
17. Berger J.M. *Information and Control*, 1961, no. 2-3(4), pp. 297–299, DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
18. Ostanin S. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 696–699, DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
19. Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, January 29–February 1 2018, Moscow, Russia, pp. 1430–1433, DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
20. 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.
21. 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.
22. Das D., Toubia N.A. *Proceedings of 17th IEEE Test Symposium*, California, USA, 1999, pp. 370–376, DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
23. Das D., Toubia N.A., Seuring M., Gossel M. *Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW)*, Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176, DOI: 10.1109/IOLT.2000.856633.
24. Mehov V., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Urganskov D. *Proceedings of 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTS'2007)*, Yerevan, Armenia, September 25–30, 2007, pp. 21–26.
25. Mekhov V.B., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Automation and Remote Control*, 2008, no. 8(69), pp. 1411–1422.
26. Bliudov A., Nazarov I., Dmitriev V., Kovalyov K. *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, September 14–17, 2018, pp. 443–449, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524722.
27. Dmitriyev V.V. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2015, no. 3, pp. 119–129. (in Russ.)
28. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V. *Automation and Remote Control*, 2019, no. 6(80), pp. 1082–1097.
29. Efanov D.V., Pashukov A.V. *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 170–179, DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581032.
30. Sogomonyan E.S., Gössel M. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1993, no. 4(4), pp. 267–281, DOI: 10.1007/BF00971975.
31. Gessel' M., Morozov A.A., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Automation and Remote Control*, 1994, no. 7, pp. 148–160.
32. Morosow A., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Goessel M. *VLSI Design*, 1998, no. 4(5), pp. 333–345, DOI: 10.1155/1998/20389.
33. *Collection of Digital Design Benchmarks*, <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>.
34. Sentovich E.M., Singh K.J., Moon C., Savoj H., Brayton R.K., Sangiovanni-Vincentelli A. *Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors*, October 11–14, 1992, Cambridge, MA, USA, pp. 328–333, DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.

Data on authors

- Dmitry V. Efanov** — Dr. Sci., Associate Professor; Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control, and Communications on Railway Transport; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materials, and Transport; Professor; E-mail: TrES-4b@yandex.ru
- Artyom V. Pashukov** — Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control, and Communications on Railway Transport; Assistant; E-mail: art_pash@mail.ru

Received 04.11.21; approved after reviewing 02.12.21; accepted for publication 28.02.22.

**АВТОНОМНЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ОЦЕНОК
ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТАЦИИ ЗВЕЗДНЫХ ДАТЧИКОВ**

Т. В. ДАНИЛОВА*, М. А. АРХИПОВА, М. А. МАСЛОВА

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
**vka@mil.ru*

Аннотация. Предложен метод формирования уточненных оценок углов положения звездных датчиков, жестко закрепленных на корпусе космического аппарата, при наличии высокоточных данных о параметрах орбиты. Приборные погрешности измерений координат звезд в датчиках составляют несколько десятых долей угловой секунды. Вышеуказанные оценки углов положения оптических осей датчиков определяются путем численного решения системы матричных уравнений. Применение метода приводит к существенному, на один-два порядка, снижению погрешностей параметров ориентации приборов относительно корпуса аппарата и как следствие — к формированию высокоточных оценок параметров ориентации корпуса космического аппарата в геоцентрической и подвижной орбитальной системах координат. Получаемые средние значения погрешностей не превышают нескольких угловых секунд, а подчас снижаются до уровня приборных погрешностей измерений координат звезд в датчиках. Приводятся результаты моделирования и рекомендации по применению метода.

Ключевые слова: автономная ориентация, автономная навигация, бортовой комплекс управления, космический аппарат, звездный датчик, случайные погрешности измерений

Ссылка для цитирования: Данилова Т. В., Архипова М. А., Маслова М. А. Автономный метод формирования оценок параметров ориентации звездных датчиков // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 247—253. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-247-253

**AUTONOMOUS METHOD FOR FORMING ESTIMATIONS
OF THE STAR TRACKERS ORIENTATION PARAMETERS**

T. V. Danilova*, M. A. Arkhipova, M. A. Maslova

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
**vka@mil.ru*

Abstract. A method is proposed for generating refined estimates of the position angles of star sensors rigidly fixed on the spacecraft body, in the presence of high-precision data on the orbit parameters. The instrumental errors in measuring stars coordinates by the sensors are several tenths of a second of arc. The estimates of the position angles of the trackers optical axes are determined by numerically solving a system of matrix equations. Application of the propose method leads to a significant, by one or two orders of magnitude, reduction in the errors in the orientation parameters of the instruments relative to the spacecraft body and, as a result, to formation of high-precision estimates of the spacecraft body orientation parameters in the geocentric and moving orbital coordinate systems. The resulting average errors do not exceed a few arcseconds, and sometimes decrease to the level of instrumental errors in measuring the coordinates of stars by the trackers. Results of modeling are presented and recommendations for the algorithm application are given.

Keywords: autonomous orientation, autonomous navigation, onboard control system, spacecraft, star tracker, random measurement errors

For citation: Danilova T. V., Arkhipova M. A., Maslova M. A. Autonomous method for forming estimations of the star trackers orientation parameters. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 247—253 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-247-253.

Введение. Повышение уровня автономности функционирования систем управления космическими аппаратами (КА) и расширение спектра задач, решаемых бортовым комплексом управления (БКУ), является общей тенденцией развития космических технологий. Одно из направлений развития БКУ — создание систем автономной навигации и ориентации, формирующих необходимые для выполнения программы полета навигационное поле и оценки ориентации корпуса КА на основе бортовых измерений. Звездные датчики (ЗД) широко применяются для определения ориентации корпуса КА в инерциальной геоцентрической и подвижной орбитальной системах координат [1—3]. Практически все современные КА оснащаются астродатчиками, научные разработки и промышленное производство которых находятся в стадии активного развития [4—8].

Возможно жесткое крепление ЗД к корпусу КА или помещение прибора в карданов подвес. В первом случае параметрами ориентации ЗД в системе координат, связанной с корпусом КА, являются углы крепления: прямое восхождение (λ) и склонение (ρ) оптической оси прибора [3].

На основе измерения координат звезд и звездных величин и последующего распознавания звезд определяется геоцентрическая ориентация осей датчика, а затем, с использованием данных о его положении относительно корпуса КА, оценивается и ориентация корпуса КА в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат (ГЭИСК). После этого оценки параметров орбиты позволяют рассчитать ориентацию КА в текущей орбитальной системе координат (ТОСК). При жестком креплении ЗД на корпусе КА углы положения известны в лучшем случае с точностью до нескольких десятков угловых секунд, что приводит к погрешностям такого же порядка в определении ориентации КА в ГЭИСК и, как следствие, даже при наличии высокоточных оценок орбиты, — в ТОСК [3, 9].

Для повышения точности оценки параметров ориентации КА, формируемых на основе астроизмерений, необходимо снижать погрешность углов крепления, следовательно, задача разработки метода формирования уточненных оценок параметров ориентации ЗД относительно корпуса КА является актуальной, ее решение имеет большое практическое значение.

Постановка задачи. Формировать оценки углов крепления ЗД на корпусе КА возможно, используя результаты измерений в приборе и расчета геоцентрической ориентации его осей, т.е. матрицы перехода из приборной системы координат (ПСК) в геоцентрическую. С другой стороны, эта матрица может быть получена на основе данных о параметрах орбиты, ориентации КА в ТОСК и положения оптической оси прибора относительно корпуса аппарата с использованием соответствующих матриц перехода, что позволяет для расчета требуемых оценок составить систему матричных уравнений.

Задача решается при следующих исходных данных. Полагается, что проведено S измерительных сеансов в P звездных датчиках, в которых случайные погрешности измерений координат звезд $\sigma_{\text{пр}}$ не превышают $0,5''$. Предварительные значения углов крепления приборов λ_{p0} и ρ_{p0} известны с определенными погрешностями: $\Delta\lambda_{p0} = \Delta\rho_{p0}$, $p = 1, \dots, P$.

Оценки параметров орбиты КА известны с точностью до нескольких десятков метров по вектору положения. Если обозначить оценки оскулирующих элементов орбиты на s -м измерительном сеансе через $\mathbf{q}_s = (a_s, e_s, i_s, \Omega_s, \omega_s, \theta_s)$, где a_s — большая полуось, e_s — эксцентриситет, i_s и Ω_s — наклонение плоскости орбиты и аргумент восходящего узла, ω_s —

аргумент перигея, θ_s — истинная аномалия, то текущая матрица перехода из ТОСК в ГЭИСК \mathbf{Q}_s , $s = 1, \dots, S$, определяется таким образом:

$$\mathbf{Q}_s = \begin{vmatrix} \cos \Omega_s \cdot \cos u_s - \sin \Omega_s \cdot \sin u_s \cdot \cos i_s & -\cos \Omega_s \cdot \sin u_s - \sin \Omega_s \cdot \cos u_s \cdot \cos i_s & \sin \Omega_s \cdot \sin i_s \\ \sin \Omega_s \cdot \cos u_s + \cos \Omega_s \cdot \sin u_s \cdot \cos i_s & \cos \Omega_s \cdot \cos u_s \cdot \cos i_s - \sin \Omega_s \cdot \sin u_s & -\cos \Omega_s \cdot \sin i_s \\ \sin u_s \cdot \sin i_s & \cos u_s \cdot \sin i_s & \cos i_s \end{vmatrix},$$

где $u_s = \omega_s + \theta_s$ — угол в орбите.

Измерительные сеансы в звездных датчиках позволяют найти матрицы перехода из приборной системы координат в геоцентрическую \mathbf{M}_{ps} [9]. Наличие этих исходных данных позволяет составить следующую систему матричных уравнений:

$$\mathbf{Q}_s \cdot \mathbf{G}_s \cdot \mathbf{W}_p = \mathbf{M}_{ps}, \quad (1)$$

где \mathbf{G}_s — матрица перехода из связанной системы координат (ССК) в ТОСК,

$$\mathbf{G}_s = \begin{vmatrix} -\sin \vartheta_s \cdot \cos \psi_s & \cos \vartheta_s \cdot \sin \gamma_s + \sin \vartheta_s \cdot \sin \psi_s \cdot \cos \gamma_s & \cos \vartheta_s \cdot \cos \gamma_s - \sin \vartheta_s \cdot \sin \psi_s \cdot \sin \gamma_s \\ \cos \vartheta_s \cdot \cos \psi_s & \sin \vartheta_s \cdot \sin \gamma_s - \cos \vartheta_s \cdot \sin \psi_s \cdot \cos \gamma_s & \sin \vartheta_s \cdot \cos \gamma_s + \cos \vartheta_s \cdot \sin \psi_s \cdot \sin \gamma_s \\ \sin \psi_s & \cos \psi_s \cdot \cos \gamma_s & -\cos \psi_s \cdot \sin \gamma_s \end{vmatrix}, \quad (2)$$

ϑ_s , ψ_s и γ_s — значения углов тангажа, рысканья и крена на измерительном сеансе; \mathbf{W}_p — матрица перехода из ПСК p -го датчика в систему координат, связанную с корпусом КА,

$$\mathbf{W}_p = \begin{vmatrix} -\sin \lambda_p & -\cos \lambda_p \cdot \sin \rho_p & \cos \lambda_p \cdot \cos \rho_p \\ \cos \lambda_p & -\sin \lambda_p \cdot \sin \rho_p & \sin \lambda_p \cdot \cos \rho_p \\ 0 & \cos \rho_p & \sin \rho_p \end{vmatrix},$$

λ_p и ρ_p — углы прямого восхождения и склонения оптической оси прибора в ССК.

Погрешности расчета элементов матриц \mathbf{M}_{ps} довольно малы, так как определяются случайными погрешностями измерения координат звезд в приборах, на один-два порядка меньшими погрешностей углов крепления прибора λ_p , ρ_p и данных об ориентации корпуса КА в ТОСК ϑ_s , ψ_s , γ_s . Погрешности расчета элементов матриц \mathbf{Q}_s при наличии высокоточных оценок параметров орбиты также малы. В силу этого погрешностями матриц \mathbf{Q}_s и \mathbf{M}_{ps} , имеющими более высокую степень малости в сравнении с погрешностями матриц \mathbf{G}_s и \mathbf{W}_p , при решении рассматриваемой задачи пренебрегаем.

Как видно из выражения (1), матрица \mathbf{M}_{ps} зависит не только от λ_p и ρ_p , но и от ϑ_s , ψ_s и γ_s , поэтому при решении системы уравнений (1) параметры ϑ_s , ψ_s и γ_s включаются в вектор неизвестных наряду с λ_p и ρ_p . В итоге система содержит m нелинейных уравнений, $m = 9PS$, с n неизвестными, $n = 2P + 3S$, причем $m > n$.

Представим данную систему в виде:

$$\mathbf{A}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}, \quad (3)$$

где совокупная матрица $\mathbf{A}(\mathbf{X})_{K \times 3} = \{\mathbf{Q}_s \cdot \mathbf{G}_s \cdot \mathbf{W}_p - \mathbf{M}_{ps}\}$, $K = 3PS$; $\mathbf{0}$ — нулевая ($K \times 3$)-матрица; \mathbf{G}_s — матрица, содержащая неизвестные ϑ_s , ψ_s и γ_s ; \mathbf{W}_p — матрица, содержащая

неизвестные λ_p и ρ_p ; \mathbf{X} — n -мерный вектор неизвестных, $\mathbf{X} = (\{\lambda_p, \rho_p\}, \{\vartheta_s, \psi_s, \gamma_s\})$, $\mathbf{X} \in \mathbf{B}$, \mathbf{B} — n -мерное ограниченное пространство неизвестных,

$$\mathbf{B} = \left(\left\{ \left[\lambda_{p0} - 3 \cdot \Delta\lambda_{p0}, \lambda_{p0} + 3 \cdot \Delta\lambda_{p0} \right], \left[\rho_{p0} - 3 \cdot \Delta\rho_{p0}, \rho_{p0} + 3 \cdot \Delta\rho_{p0} \right] \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \left[\vartheta_{s0} - 3 \cdot \Delta\vartheta_{s0}, \vartheta_{s0} + 3 \cdot \Delta\vartheta_{s0} \right], \left[\psi_{s0} - 3 \cdot \Delta\psi_{s0}, \psi_{s0} + 3 \cdot \Delta\psi_{s0} \right], \right. \right. \\ \left. \left. \left[\gamma_{s0} - 3 \cdot \Delta\gamma_{s0}, \gamma_{s0} + 3 \cdot \Delta\gamma_{s0} \right] \right\} \right). \quad (4)$$

Здесь центральные точки отрезков λ_{p0} , ρ_{p0} и определяющие длину отрезков погрешности $\Delta\lambda_{p0}$, $\Delta\rho_{p0}$ заданы априори; значения ϑ_{s0} , ψ_{s0} и γ_{s0} на каждом измерительном сеансе рассчитываются из матрицы \mathbf{G}_s , имеющей вид (2); величины погрешностей углов тангажа, рысканья и крена определяются через погрешности углов крепления: $\Delta\vartheta_{j0} = \Delta\psi_{j0} = \Delta\gamma_{j0} = 3\sqrt{2}\Delta\lambda$, где $\Delta\lambda = \max_p \Delta\lambda_{p0}$.

Матрица \mathbf{G}_s рассчитывается на основе данных об орбите и результатов измерений в звездных датчиках: $\mathbf{G}_s = \mathbf{Q}_s^T \cdot \tilde{\mathbf{F}}_s$, где $\tilde{\mathbf{F}}_s$ — матрица перехода из ГЭИСК в ССК на навигационном сеансе s , $\mathbf{F}_s = \frac{1}{P} \cdot \sum_{p=1}^P (\mathbf{W}_p \cdot \mathbf{M}_{ps}^T)$, знак „ \sim “ означает операцию ортогонализации матрицы по строкам, которая осуществляет приведение каждой строки к вектору единичной длины.

Сформированная система уравнений (3) решается численно, путем минимизации нормы матрицы левой части $N(\mathbf{A}(\mathbf{X})) = \sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^3 a_{kj}^2}$, определяемой как корень квадратный из суммы квадратов элементов матрицы.

Таким образом, требуется найти $\mathbf{X}_{\text{opt}} \in \mathbf{B}$: $N(\mathbf{A}(\mathbf{X}_{\text{opt}})) = \min_{\mathbf{X} \in \mathbf{B}} N(\mathbf{A}(\mathbf{X}))$.

Алгоритм решения. При инициализации 1-го этапа для минимизируемой нормы матрицы левой части решаемой системы (3) устанавливается начальное пространство переменных $\mathbf{B}' = \mathbf{B}$, где \mathbf{B} определено выражением (4).

Для пространства переменных \mathbf{B}' выполняются следующие четыре шага.

1. Установка начального значения искомого вектора \mathbf{X} , компоненты которого принимают, как вариант, левые значения соответствующих отрезков в пространстве переменных. Расчет корректирующего n -мерного вектора \mathbf{H} , зависящего от \mathbf{B}' и имеющего смысл шага в пространстве переменных. Элементы вектора \mathbf{H} принимают значения в зависимости от длины соответствующих отрезков в одномерном подпространстве \mathbf{B} .

2. Расчет матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{X})$ левой части системы (3) и нормы N матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{X})$.

3. Если $N < N_{\min}$, то $\mathbf{X}_{\text{opt}} = \mathbf{X}$ и $N_{\min} = N$.

4. Формирование следующего вектора $\mathbf{X} = \mathbf{X} + f(\mathbf{H})$. Если не достигнут конец перебора, то происходит возврат на шаг 2. Иначе — конец этапа алгоритма.

По завершении этапа осуществляется формирование нового пространства переменных \mathbf{B}' , являющегося окрестностью полученной оптимальной точки \mathbf{X}_{opt} : $\mathbf{B}' = \mathbf{O}(\mathbf{X}_{\text{opt}})$.

Для сформированного нового пространства переменных \mathbf{B}' с новым корректирующим вектором \mathbf{H} , компоненты которого, по сравнению с предыдущим этапом, существенно уменьшаются, выполняются шаги 1—4. Итерации внешнего уровня (этапы) завершаются, ко-

гда наибольший элемент вектора \mathbf{H} (h_{\max}) не будет превосходить половины случайной погрешности измерений в звездном датчике, т.е. при выполнении условия $h_{\max} \leq 0,5\sigma_{\text{пр}}$.

Из приведенного алгоритма следует, что при переходе на каждый следующий этап пространство переменных значительно сужается. Такой прием позволил сократить время решения задачи практически на два порядка в сравнении с обычным перебором вариантов.

В силу того что перебор осуществляется с некоторым дискретным шагом, найденное решение является не строго оптимальным, а лишь приближенным к нему с точностью до величины шага на завершающем этапе. Однако данное обстоятельство не оказывает заметного влияния на качество решения задачи, поскольку речь идет о поиске результата в условиях, допускающих некоторые его вариации, вследствие наличия погрешностей в параметрах орбиты и измерений в звездных датчиках, т.е. в матрицах \mathbf{Q}_s и \mathbf{M}_{ps} , которыми, как было указано выше, пренебрегаем.

Для успешного решения поставленной задачи углы крепления λ_p и ρ_p должны принимать такие значения, чтобы соответствующие оси приборов были попарно неколлинеарны. При выполнении этого условия по результатам измерений на одном навигационном сеансе ($P=1$) путем численного решения системы (3) вышеописанным алгоритмом определяются углы ρ_p , ϑ_1 и γ_1 , а также сумма углов рысканья ψ_1 и прямого восхождения оптической оси приборов λ_p , причем для последних, отсчитываемых в одной плоскости, выполняется соотношение $\lambda_p + \psi_1 = C_p = \text{const}$. Погрешности расчетов при этом отличаются от приборных погрешностей не более чем на порядок, а иногда достигают уровня $0,5\sigma_{\text{пр}}$. Для формирования оценок λ_p и ψ_1 необходим, по крайней мере, еще один измерительный сеанс, причем значения углов рысканья на измерительных сеансах должны отличаться на величину, превышающую $\sigma_{\text{пр}}$ не менее чем на порядок.

Результаты моделирования. Работа предложенного алгоритма моделировалась в среде автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов АСНИ 2.0 [3].

На мерном интервале в один виток моделировалось сто измерений в двух жестко закрепленных ЗД, приборная погрешность измерений координат звезд $\sigma_{\text{пр}} = 0,3''$. Предварительные погрешности углов крепления приборов $\Delta\lambda = \Delta\rho = 30''$.

Оценивались средние и максимальные на мерном интервале значения погрешностей Δ параметров ориентации осей X , Y , Z корпуса КА в ГЭИСК и углов тангажа, рысканья и крена.

На рис. 1 приведены результаты применения алгоритма при расчете параметров ориентации корпуса КА в ГЭИСК как на низких и средних околоземных орбитах (НОО и СОО), так и на геостационарной орбите (ГСО): a — средние, b — максимальные значения погрешностей. На рис. 2 представлены аналогичные результаты в ТОСК. Как видно из графиков, до применения рассматриваемого алгоритма, когда $\Delta\lambda = \Delta\rho = 30''$, оцениваемые погрешности ориентации лежат в пределах 12—45'' (диаграммы А). После использования погрешности углов крепления $\Delta\lambda$ и $\Delta\rho$ снижаются более чем на порядок и достигают уровня 1—1,5'', вследствие этого погрешности ориентации корпуса КА в геоцентрической и орбитальной системах координат также значительно снижаются (диаграммы Б), средние оценки достигают уровня 1—3'', а максимальные не превосходят 7''.

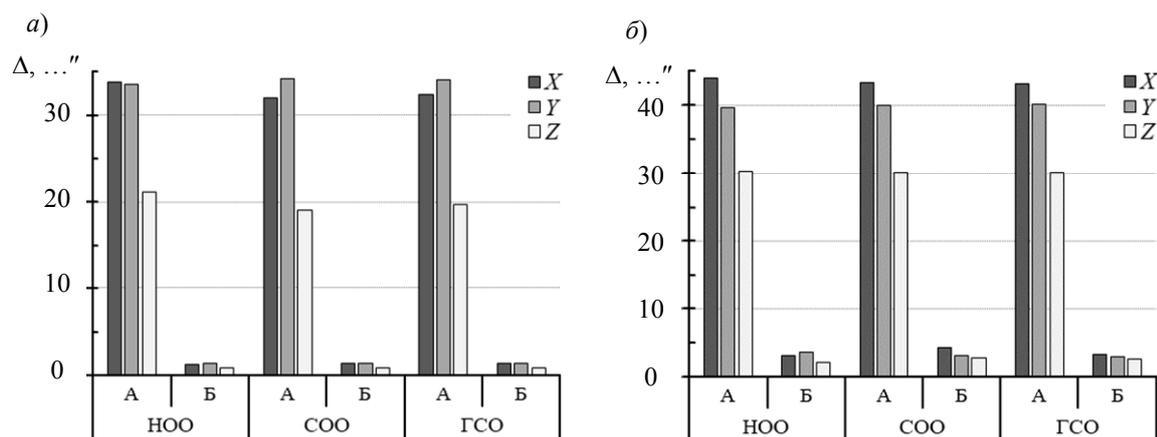


Рис. 1

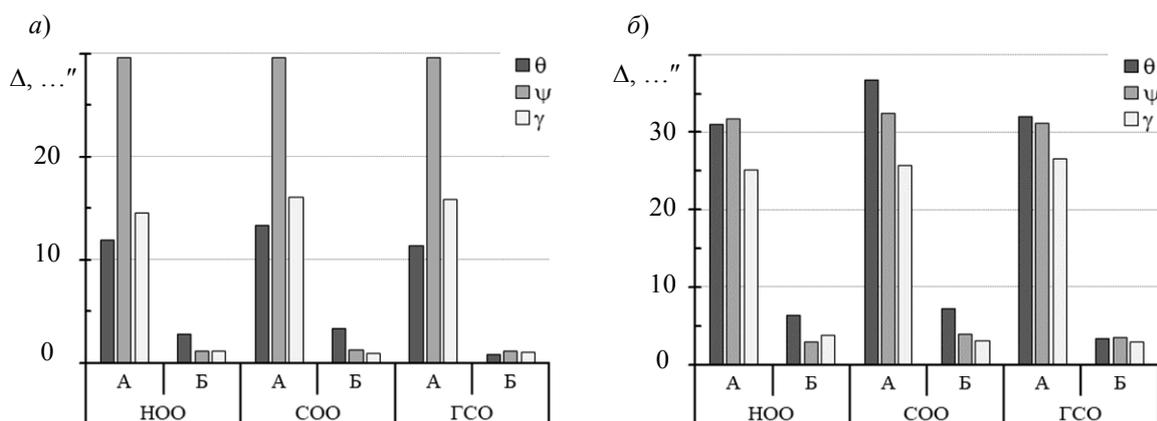


Рис. 2

Заключение. Представленный метод формирования уточненных оценок углов крепления звездных датчиков на корпусе космического аппарата является составной частью разрабатываемого ядра астрономической системы автономной навигации и ориентации [3], предназначенной для КА широкого применения. Использование алгоритма при наличии высокоточных (порядка двух-трех десятков метров по положению) оценок орбиты КА и проведении измерений в 3Д со случайными погрешностями, не превышающими $0,5''$, обеспечивает существенное (на один-два порядка) снижение погрешностей углов крепления прибора относительно корпуса КА. Это, в свою очередь, влечет повышение точности формируемых на основе астроизмерений параметров ориентации корпуса КА в инерциальной геоцентрической и подвижной орбитальной системах координат до уровня не выше $1-3''$, а подчас порядка приборных погрешностей звездного датчика.

Предлагаемый метод эффективен, но довольно ресурсоемок, однако он не требует постоянного включения в контур функционирования бортового комплекса управления. Его следует применять при инициализации системы автономной навигации и ориентации, при смене оборудования (звездных датчиков), в случаях возникновения нештатных ситуаций, вызвавших нарушение функционирования бортовой системы ориентации, а также в профилактических целях с определенной периодичностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов В. Г., Емельянов С. Г. Астронавигация космических аппаратов на круговых околоземных орбитах // Изв. Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3(66). С. 34—44.
2. Adnane A., Bellar A., Si Mohammed M. A. Spacecraft Attitude Estimation Based on Star Tracker and Gyroscope Sensors // ResearchGate [Электронный ресурс]: <<https://www.researchgate.net/publication/307877953>>. (дата обращения 11.10.21).

3. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Теория и практика навигационного обеспечения применения ВС РФ. Ч. 2. Автономная астрономическая навигация и ориентация космических аппаратов: монография. СПб: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. 233 с.
4. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Форш А. А., Куделин М. И. Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звездной ориентации семейства БОКЗ // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 1. С. 3—13.
5. Star trackers // Ball [Электронный ресурс]: <<https://www.ball.com/aerospace/markets-capabilities/capabilities/technologies-components/star-trackers>>. (дата обращения 11.10.21).
6. Star trackers // Sodern [Электронный ресурс]: <https://www.sodern.com/website/en/ref/Star-trackers_323.html>. (дата обращения 11.10.21).
7. Star trackers. Fully autonomous attitude determination and world-renowned accuracy // Terma [Электронный ресурс]: <<https://www.terma.com/markets/space/space-segment/star-trackers/>>. (дата обращения 11.10.21).
8. Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Сазонов В. В. Оценка точности определения параметров ориентации звездного датчика // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 11. С. 111—130.
9. Данилова Т. В., Архипова М. А. Определение ориентации корпуса космического аппарата в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат на основе астроизмерений при отсутствии данных о параметрах орбиты // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 13—20.

Сведения об авторах

- Тамара Валентиновна Данилова** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, военный институт (научно-исследовательский); старший научный сотрудник; E-mail: danitoma58@yandex.ru
- Марина Александровна Архипова** — ВКА им. А. Ф. Можайского, военный институт (научно-исследовательский); старший научный сотрудник; E-mail: marina_arhipova@mail.ru
- Марина Александровна Маслова** — ВКА им. А. Ф. Можайского, военный институт (научно-исследовательский); старший научный сотрудник; E-mail: maralemas2009@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.21; одобрена после рецензирования 05.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Andronov V.G., Emelyanov S.G. *Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 3(66), pp. 34—44. (in Russ.)
2. Adnane A., Bellar A., Si Mohammed M.A. *ResearchGate*, <https://www.researchgate.net/publication/307877953>.
3. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Teoriya i praktika navigatsionnogo obespecheniya primeneniya VS RF. Chast' 2. Avtonomnaya astronomicheskaya navigatsiya i oriyentatsiya kosmicheskikh apparatov* (Theory and Practice of Navigation Support for the Use of the RF Armed Forces. Part 2. Autonomous Astronomical Navigation and Spacecraft Orientation), St. Petersburg, 2015, 233 p. (in Russ.)
4. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Forsh A.A., Kudelin M.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 1(58), pp. 3—13. (in Russ.)
5. *Ball*, <https://www.ball.com/aerospace/markets-capabilities/capabilities/technologies-components/star-trackers>.
6. *Sodern*, https://www.sodern.com/website/en/ref/Star-trackers_323.html.
7. *Terma*, <https://www.terma.com/markets/space/space-segment/star-trackers/>.
8. Bessonov R.V., Kurkina A.N., Sazonov V.V. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2017, no. 11(29), pp. 111—130.
9. Danilova T.V., Arkhipova M.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, no. 7(56), pp. 13—20. (in Russ.)

Data on authors

- Tamara V. Danilova** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Researcher; E-mail: danitoma58@yandex.ru
- Marina A. Arkhipova** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Researcher; E-mail: marina_arhipova@mail.ru
- Marina A. Maslova** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Military Research Institute; Senior Researcher; E-mail: maralemas2009@gmail.com

Received 15.11.21; approved after reviewing 05.12.21; accepted for publication 28.02.22.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

УДК 536.531
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

О. Г. БОНДАРЬ*, Е. О. БРЕЖНЕВА, П. С. РОДИОНОВ

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия,
** b.og@mail.ru*

Аннотация. Предложен метод многоканального измерения температуры, заключающийся в поочередном питании n термометров сопротивления. Метод позволяет повысить точность измерения за счет ослабления влияния сопротивления линий, с помощью которых осуществляется подключение термометров сопротивления. Разработан макет многоканального преобразователя температуры, на котором проведена апробация метода.

Ключевые слова: многоканальное измерение температуры, точность измерений, микроконтроллер, термометр сопротивления

Ссылка для цитирования: Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 254—261. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261

MULTI-CHANNEL TEMPERATURE CONVERTER

O. G. Bondar*, E. O. Brezhneva, P. S. Rodionov

The Southwest State University, Kursk, Russia
b.og@mail.ru

Abstract. A method for multichannel temperature measurement is proposed, which consists in alternately supplying n resistance thermometers. The method makes it possible to increase the accuracy of measurement by weakening the influence of the resistance of the lines through which resistance thermometers are connected. A prototype of multichannel temperature converter is developed and used for the method testing.

Keywords: multichannel temperature measurement, measurement accuracy, microcontroller, resistance thermometer

For citation: Bondar O. G., Brezhneva E. O., Rodionov P. S. Multi-channel temperature converter. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 254—261 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261.

Введение. Системы автоматизированного управления технологическими процессами и системы сбора данных обычно содержат распределенную сеть датчиков, среди которых одно из ведущих мест занимают преобразователи температуры [1—4]. Одним из самых распространенных видов преобразователей температуры являются термометры сопротивления (терморезисторы, термосопротивления). Для измерения сопротивления такого преобразователя используется делитель напряжения, образованный опорным резистором и термометром сопротивления (ТС). Измерив падение напряжения на ТС, а также зная опорное напряжение и сопротивление опорного резистора, можно определить величину сопротивления ТС, зависящую от температуры, а по известной зависимости сопротивления от температуры — и температуру [5—9].

В случае удаленного подключения ТС сопротивление соединительных проводов оказывает существенное влияние на точность измерений, так как ток измерительной цепи вызывает дополнительное падение напряжения на ТС. Наиболее существенно оно в простейших двухпроводных схемах подключения. Известны решения, позволяющие уменьшить или исключить влияние сопротивления проводников на результат измерения, — трехпроводные и четырехпроводные подключения термометров сопротивления [10].

Влияние сопротивления соединительных проводов в трехпроводных схемах ослабляется путем компенсации. Полная компенсация достигается при равенстве сопротивлений соединительных проводов, а также идентичности их температурных зависимостей, что является основным условием применимости трехпроводной схемы. В четырехпроводной схеме питание ТС током возбуждения производится с помощью одних проводов, а измерение разности потенциалов на нем — с помощью других. При этом, согласно ГОСТ 6651-2009, использование двухпроводной схемы не допускается для термометров сопротивления классов точности АА (допуск $\pm(0,1+0,0017|t|)$ °С) и А (допуск $\pm(0,15+0,002|t|)$ °С).

Вместо использования делителя напряжения можно осуществлять питание ТС известным током генератора тока. При этом падение напряжения на ТС пропорционально его сопротивлению. Однако такой способ питания не упрощает измерительных схем при использовании длинных соединительных линий.

Недостатками перечисленных решений, по сравнению с двухпроводным вариантом, являются сложные измерительные схемы и высокая стоимость трехпроводных и четырехпроводных кабелей.

Для ослабления влияния на точность измерения температуры разогрева ТС протекающим током, ТС работают при малых величинах токов, что снижает падение напряжения на них и увеличивает влияние шумов, помех и погрешностей электронных узлов на результат измерения. Это обуславливает дальнейшее усложнение измерительных цепей, а также применение фильтрации, влекущей за собой снижение быстродействия. Усложнение измерительных цепей также снижает их надежность. Перечисленные недостатки усугубляются в системах сбора данных вследствие необходимости коммутации большого количества каналов измерения температуры.

Для снижения требований к чувствительности измерительных схем, величине термоЭДС и температурным дрейфам напряжения в измерительных цепях целесообразно использовать импульсный режим возбуждения датчика температуры. Подобный подход хорошо зарекомендовал себя, например, при подогреве чувствительных элементов термokatалитических газочувствительных датчиков и измерении их сопротивления [11—14]. В этом случае при сохранении среднего значения тока его амплитуду можно увеличить в несколько раз и соответственно снизить требования к чувствительности измерительной схемы.

Метод повышения падения напряжения на ТС реализован устройством [15], в котором при изменении сопротивления термопреобразователя вследствие изменения температуры контролируемой среды автоматически изменяется ток питания термометра сопротивления с целью получения максимального уровня сигнала при допустимой мощности рассеивания. Для этого в устройство включен блок стабильных источников тока, в котором каждый источник настроен на генерацию заданного фиксированного тока опроса для конкретного диапазона значений сопротивлений термопреобразователя. Вычислительный блок компенсирует аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности.

Недостатком такого решения является то, что выигрыш в мощности сигнала, получаемого с ТС, оказывается небольшим, а сложность устройства резко возрастает, что снижает его надежность.

В [16] представлен еще один метод существенного повышения уровня сигнала при упрощении устройства и, следовательно, снижения погрешности. Устройство содержит источник постоянного напряжения, поочередно подключаемый с помощью n -канального коммутатора к

делителям, образованным ТС и общим для них опорным резистором. Второй коммутатор поочередно подключает термометры сопротивления к аналого-цифровому преобразователю.

Выходной сигнал аналого-цифрового преобразователя поступает в контроллер, который управляет работой двух коммутаторов, поочередно измеряя напряжение на делителях, образованных термометрами сопротивления и опорным резистором, и на собственно опорном резисторе. По измеренным значениям напряжения на каждом из делителей и опорном резисторе, а также по известному сопротивлению этого резистора вычисляется сопротивление каждого ТС, а затем определяется соответствующая температура.

Недостатком этого метода измерения температуры является существенное возрастание погрешности за счет сопротивления проводов линии, с помощью которой подключается ТС, и повышенная сложность, обусловленная наличием второго коммутатора с $(n+1)$ входом (дополнительный вход используется для измерения напряжения на опорном резисторе).

Многоканальное измерение температуры. Согласно предлагаемому решению точность измерения повышается за счет ослабления влияния сопротивления линий, с помощью которых подключается ТС, при этом снижается сложность самого устройства.

Питание поочередно подается на каждый из n ТС, сопротивление которых определяется по падению напряжения на опорном резисторе по окончании импульса напряжения и напряжения на входе линии, подключенном к опорному резистору, после отключения опорного резистора от источника питания.

Важной особенностью этого метода является то, что ТС шунтированы конденсаторами в точках их подключения к концу соединительной двухпроводной линии. Питание ТС осуществляется через соответствующие линии и общее опорное сопротивление импульсом напряжения со скажностью, при которой средний ток через ТС не превышает допустимой величины, а емкость конденсаторов выбирается такой, чтобы за время действия импульса напряжения завершился переходный процесс заряда конденсатора. Импульс напряжения заканчивается отключением опорного резистора от источника питания.

Устройство многоканального преобразования температуры. На рис. 1 представлена структурная схема устройства, реализующего предложенный метод измерения температуры. Рассматриваемая схема является трехканальной.

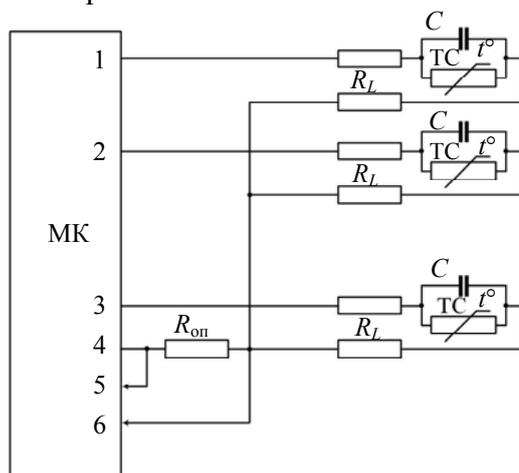


Рис. 1

Основой схемы является микроконтроллер МК (в данном случае — со встроенным аналого-цифровым преобразователем). Помимо него схема содержит опорный резистор $R_{оп}$, термометры сопротивления ТС, шунтированные конденсаторами C , соединительные двухпроводные линии R_L , представленные сопротивлениями ее проводов. Выходы 1, 2, 3 микроконтроллера присоединены к первым входам линий R_L , а вторые входы линий соединены и подключены к первому выводу опорного резистора $R_{оп}$, второй вывод которого присоединен к выводу 4 микроконтроллера. Оба вывода опорного резистора $R_{оп}$ соединены со входами 5 и 6

встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя, а к выходам двухпроводных линий R_L присоединены ТС, шунтированные конденсаторами.

Устройство функционирует следующим образом. В начальном состоянии микроконтроллер удерживает выходы 1—3 в высокоимпедансном состоянии (в этом режиме они ориентированы на ввод), а на выходе 4 устанавливает логический нуль. При этом ток в цепях термометров сопротивлений отсутствует. На первый вход выбранной линии R_L подается низкое напряжение с одного из выходов (1, 2 или 3) микроконтроллера, а на вывод 4 в течение времени t — высокое. При подаче импульса напряжения протекающий в выбранной линии ток обеспечивает падение напряжения на термометре сопротивления и заряжает шунтирующий его конденсатор. К концу импульса длительностью t конденсатор заряжается до установившегося значения. Установившееся напряжение меньше напряжения источника питания на величину падения напряжения на выходных сопротивлениях микроконтроллера, а также падения напряжения на опорном резисторе и сопротивлениях проводов линии.

В конце интервала t измеряется напряжение на опорном резисторе $R_{оп}$, между входами 5 и 6 встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя. По завершении интервала t выход 4 микроконтроллера переводится в высокоимпедансное состояние, а ток в измерительной цепи устанавливается равным нулю. При этом на входе 6 измеряется напряжение на втором входе линии R_L , присоединенном к первому выводу опорного резистора. Это напряжение равно напряжению на термометре сопротивления, шунтированном конденсатором.

Выборка напряжения схемой выборки-хранения аналого-цифрового преобразователя осуществляется в первый момент времени после разрыва цепи, потому измеряемое напряжение соответствует напряжению на конденсаторе и ТС в конце интервала заряда t . Поскольку при полностью заряженном конденсаторе в конце импульса напряжения через опорный резистор и термометр сопротивления протекает один и тот же ток, то падение напряжения на опорном резисторе $U_{оп}$ и термометре сопротивления $U_{ТС}$ пропорционально их сопротивлениям $R_{оп}$ и $R_{ТС}$ соответственно:

$$R_{ТС} = R_{оп} \times U_{ТС} / U_{оп}.$$

Таким образом, по измеренным напряжениям и сопротивлению опорного резистора можно рассчитать сопротивление ТС, а по нему — температуру.

После этого выходы микроконтроллера переводятся в высокоимпедансное состояние, выдерживается пауза, обеспечивающая требуемое значение среднего тока термометра сопротивления, выбирается следующая линия, устанавливается логический нуль на очередном выводе (из 1—3) уровень, и процесс измерения повторяется для следующего ТС.

Период повторения циклов опроса ТС и длительность импульса обеспечивают не превышение допустимого значения тока. Число измерительных каналов температуры может быть большим, оно ограничивается количеством портов микроконтроллера. При этом для реализации метода измерения температуры достаточно лишь двух входов аналого-цифрового преобразователя.

Сопротивление выходных каскадов портов может рассматриваться как часть сопротивления проводников линии, и оно не влияет на результат измерения, так как падение напряжения в конце импульса длительности t измеряется непосредственно на опорном резисторе. Второе измерение на втором входе линии осуществляется после перевода выхода 4 микроконтроллера в высокоимпедансное состояние. В этом случае ток в линии R_L , с помощью которой подключен ТС, практически отсутствует, как и падение напряжения на проводниках линии и выходном сопротивлении выходов микроконтроллера (входное сопротивление аналого-цифрового преобразователя превышает 100 МОм). Таким образом, выходные сопротивления портов микроконтроллера не влияют на результат измерения.

При повышении требований к точности измерений может использоваться внешний аналого-цифровой преобразователь, а напряжение на ТС может измеряться в нескольких точках переходного процесса разряда шунтирующего конденсатора.

Моделирование схемы преобразователя температуры и обсуждение результатов.

Апробация предложенного решения проводилась с помощью экспериментального стенда на базе микроконтроллера *ATmega 328P* (рис. 2).

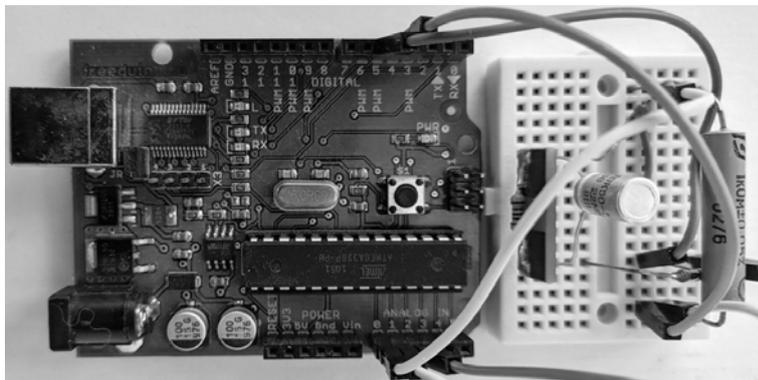


Рис. 2

На рис. 3 представлена схема стенда, включающая: опорный резистор, сопротивление провода линии подключения термометра сопротивления, термометр сопротивления, конденсатор, микроконтроллер (1 — цифровой двунаправленный вывод возбуждения измерительной цепи, 2 — вход аналого-цифрового преобразователя для измерения напряжения на входе измерительной цепи, 3 — вход аналого-цифрового преобразователя для измерения напряжения на входе линии подключения термометра сопротивления, 4 — двунаправленный вывод коммутации канала многоканальной измерительной системы, 5 — общий провод системы многоканального измерения температуры). На схеме величина сопротивления опорного резистора 1 кОм, погрешность 0,05 %, измеряемый резистор 1 кОм, погрешность 5 %.

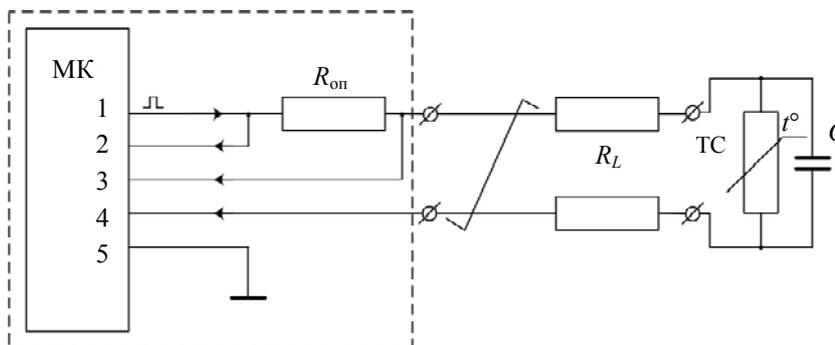


Рис. 3

Измеренное откалиброванным мультиметром *RICHMETERS 113D* сопротивление измеряемого резистора 963 Ом (+/-0,2 %). Соединительные линии имитировались двумя резисторами по 120 Ом.

При измерениях на выводе 4 микроконтроллера устанавливается логический нуль, поэтому линия, соединяющая ТС с МК, подключается к общему проводу системы через выходное сопротивление буфера МК, увеличивая суммарное сопротивление соединительной линии.

Встроенный в микроконтроллер аналого-цифровой преобразователь не имеет дифференциального режима измерений, поэтому напряжение на опорном резисторе вычисляется через напряжения, измеренные на входах 2 и 3 в конце переходного процесса заряда конденсатора:

$$U_{\text{оп}} = U_2 - U_3.$$

Это напряжение определяется исключительно током, протекающим через активные сопротивления цепи ($R_{\text{оп}}$, R_L , r_{TC} и выходные сопротивления МК), поскольку конденсатор уже заряжен.

При завершении импульса питания цепь ТС разрывается переводом вывода 1 МК в высокоимпедансное состояние. Поскольку ток в цепи ТС отсутствует, то и падение напряжения

между выводами 4 и общим проводом системы 5 практически равно нулю. Поэтому напряжение, измеренное на входе 3 МК, равно напряжению на конденсаторе и ТС, включенных параллельно. Вычисление сопротивления ТС осуществляется МК в соответствии с (1).

На рис. 4 представлены временные диаграммы сигналов (верхняя — на входе измерительной цепи; нижняя — на входе линии подключения датчика). Управление измерительной схемой, вычисление значений сопротивления ТС и передача их в компьютер осуществляются с помощью разработанной программы *Termo_Net_M^{can}*. Результаты представлены в таблице (среднеквадратическое отклонение определено относительно среднего значения).

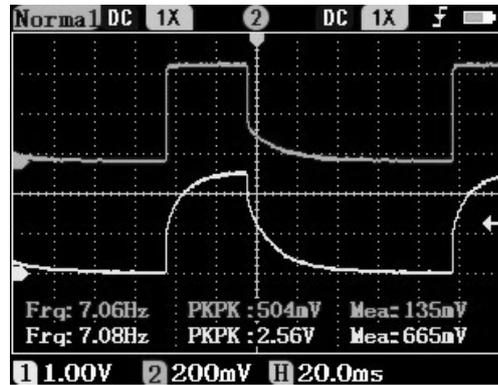


Рис. 4

Результаты измерения сопротивления

№ измерения	R_t , Ом
1	0,959
2	0,96
3	0,96
4	0,96
5	0,96
6	0,96
7	0,961
8	0,96
9	0,96
10	0,961
11	0,96
12	0,96
13	0,961
14	0,961
15	0,96
16	0,96
17	0,96
18	0,96
19	0,96
20	0,96
21	0,96
22	0,96
23	0,96
24	0,96
25	0,96
26	0,96
27	0,96
28	0,96
29	0,961
30	0,96
Среднее значение	0,96013
СКО	0,00043

Согласно таблице, измеренное номинальное сопротивление резистора (R_t) составило 960 Ом (действительное значение 963 Ом, относительная погрешность 0,3 %) при суммарном сопротивлении линии 240 Ом, что убедительно доказывает высокую степень подавления влияния соединительной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрусев А. В., Миронов С. А. Расчет характеристик чувствительного элемента волоконно-оптического датчика температуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 6. С. 49—52.
2. Чивель Ю. А., Зятягин Д. А., Смулов И. Ю. Система мониторинга процесса селективного лазерного спекания // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 4. С. 70—73.
3. Федоров А. В., Тагиев Ш. К. Метод регулирования теплового режима при барботаже концентрированного раствора растительного масла // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 12. С. 50—54.
4. Киба Д. А., Любушкина Н. Н., Гудим А. С., Биткина А. А. Регистратор условий хранения и транспортировки специализированных грузов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 668—674.
5. Kasparov K. N., Belozarov A. V. Measurement of the Temperature of High-Speed Processes // Measurement Techniques. 2002. Vol. 45, N 12. P. 1256—1263.
6. Куликов В. А., Муравьев В. В., Никитин К. А., Брагин Г. В. Измерение температуры рельсов в бесстыковом пути // Измерительная техника. 2017. Т. 60, № 5. С. 53—55.
7. Филатов А. В., Сердюков К. А., Новикова А. А. Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления // Измерительная техника. 2020. Т. 63. № 7. С. 51—55.
8. Су Ц., Кочан О. В., Йоцов В. С. Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры // Измерительная техника. 2015. Т. 58, № 3. С. 52—55.
9. Волков Б. И., Новицкий Д. М. Анализ погрешностей измерений температуры, обусловленных неточностью модели измерительно-вычислительного преобразователя // Измерительная техника. 2004. Т. 47, № 3. С. 24—27.
10. Андрусевич А., Губа А. Термометры сопротивления: от теории к практике // Компоненты и технологии. 2011. № 7. С. 61—66.
11. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Полякова А. В. Применение микроконтроллера для температурной стабилизации полупроводниковых газочувствительных датчиков // Датчики и системы. 2014. № 2. С. 41—46.
12. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поздняков В. В. Реализация изотермического режима термокаталитических газочувствительных датчиков // Датчики и системы. 2016. № 2. С. 43—47.
13. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О. Изотермический режим газочувствительных каталитических датчиков // Изв. ЮЗГУ. 2012. Ч. 3. № 2(41). С. 27—31.
14. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поздняков В. В. Методы и алгоритмы управления термокаталитическим датчиком водорода // Измерительная техника. 2018. Т. 61, № 5. С. 669—672.
15. Пат. 1394062 РФ, МПК G01K7/00 (2006.01). Устройство для измерения температуры / В. Е. Безвенок, Г. Е. Богославский., Ю. В. Голубев, В. С. Зеленский, А. В. Синельников. Заяв. № 4083692, 1986.07.03. Оpubл.1988.05.07. Бюл. № 17.
16. Пат. 2534633 РФ, МПК G01K 7/18(2006.01). Устройство для измерения температуры среды / А. Ф. Буслаев. Заяв. № 2013113068/28, 2013.03.22. Оpubл. 2014.12.10. Бюл. № 17.

Сведения об авторах

Олег Григорьевич Бондарь

— канд. техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра космического приборостроения и систем связи; E-mail: b.og@mail.ru

Екатерина Олеговна Брежнева

— канд. техн. наук; Юго-Западный государственный университет, кафедра космического приборостроения и систем связи; доцент; E-mail: bregnevaeo@mail.ru

Павел Сергеевич Родионов

— студент; Юго-Западный государственный университет, кафедра космического приборостроения и систем связи;
E-mail: pasha.rodionov.0202@mail.ru

Поступила в редакцию 07.12.21; одобрена после рецензирования 21.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Kondrusev A.V., Mironov S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2003, no. 6(46), pp. 49–52. (in Russ.)
2. Chivel Yu.A., Zatyagin D.A., Smurov I.Yu. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 4(51), pp. 70–73. (in Russ.)
3. Fedorov A.V., Tagiev Sh.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 12(48), pp. 50–54. (in Russ.)
4. Kiba D.A., Lyubushkina N.N., Gudim A.S., Bitkina A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 7(62), pp. 668–674. (in Russ.)
5. Kasparov K.N., Belozerov A.V. *Measurement Techniques*, 2002, no. 12(45), pp. 1256–1263.
6. Kulikov V.A., Murav'ev V.V., Nikitin K.A., Bragin G.V. *Measurement Techniques*, 2017, no. 5(60), pp. 487–490.
7. Filatov A.V., Serdyukov K.A., Novikova A.A. *Measurement Techniques*, 2020, no. 7(63), pp. 567–572.
8. Jun S., Kochan O.V., Jotsov V.S. *Measurement Techniques*, 2015, no. 3(58), pp. 327–331.
9. Volkov B.I., Novitskii D.M. *Measurement Techniques*, 2004, no. 3(47), pp. 247–253.
10. Andrusevich A., Guba A. *Komponenty i tekhnologii* (Components and Technologies), 2011, no. 7, pp. 61–66. (in Russ.)
11. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Polyakova A.V. *Datchiki i sistemy*, 2014, no. 2, pp. 41–46. (in Russ.)
12. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Pozdnyakov V.V. *Datchiki i sistemy*, 2016, no. 2, pp. 43–47. (in Russ.)
13. Bondar O.G., Brezhneva E.O. *Proceedings of Southwest State University*, 2012. Pt. 3, no. 2(41), pp. 27–31. (in Russ.)
14. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Pozdnyakov V.V. *Measurement Techniques*, 2018, no. 5(61), pp. 514–519.
15. Pat. RU 1394062, G01K7/00 (2006.01), *Ustroystvo dlya izmereniya temperatury* (Device for Measuring the Temperature), V.E. Bezvenyuk, G.E. Bogoslavsky, Yu.V. Golubev, V.S. Zelensky, A.V. Sinelnikov, Patent application no. 4083692, Priority 1988.05.07, Published Bulletin 17. (in Russ.)
16. Pat. RU 2534633, G01K 7/18(2006.01), *Ustroystvo dlya izmereniya temperatury sredy* (Device for Measuring the Temperature of the Environment), A.F. Buslaev, Patent application no. 2013113068/28, Priority 2013.03.22, Bulletin 17. (in Russ.)

Data on authors**Oleg G. Bondar**

— PhD, Associate Professor; The Southwest State University, Department of Space Instrumentation and Communication Systems;
E-mail: b.og@mail.ru

Ekaterina O. Brezhneva

— PhD; The Southwest State University, Department of Space Instrumentation and Communication Systems; Associate Professor;
E-mail: bregnevaeo@mail.ru

Pavel S. Rodionov

— Student; The Southwest State University, Department of Space Instrumentation and Communication Systems;
E-mail: pasha.rodionov.0202@mail.ru

Received 07.12.21; approved after reviewing 21.12.21; accepted for publication 28.02.22.

**АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ ПОВОРОТА ОБЪЕКТА
АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРИЭДРИЧЕСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГРАНЬЮ**

М. М. Никитин*, И. А. Коняхин, Ф. Г. Добрых

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
** nikitinmm96@gmail.com*

Аннотация. Предложен алгоритм определения угла поворота контрольного элемента для автоколлимационной системы, использующей отражатель в виде триэдрического контрольного элемента с цилиндрической гранью. Этот тип отражателей используется для определения трехмерного углового пространственного положения объекта. Создана математическая модель отражателя, воспроизводящая взаимодействие излучения с отражателем. На основе получаемых изображений согласно модели разработан алгоритм определения угла поворота контрольного элемента. Алгоритм обеспечивает фильтрацию изображения от шумов; уменьшение толщины линий, находящихся на изображении, для повышения точности определения угла поворота; наложение темной области на центр изображения, для возможности последующей кластеризации линий; непосредственно определение угла поворота линий на изображении для последующего определения угла поворота контрольного элемента. Алгоритм позволяет анализировать картину, получаемую от отражателя, имеющего более одной цилиндрической грани.

Ключевые слова: автоколлимационная система, цилиндрическая грань, алгоритм обработки изображения, пространственное угловое положение объекта

Ссылка для цитирования: Никитин М. М., Коняхин И. А., Добрых Ф. Г. Алгоритм измерения углов поворота объекта автоколлимационным методом при использовании триэдрического отражателя с цилиндрической гранью // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 262—270. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-262-270.

**ALGORITHM FOR OBJECT ROTATION ANGLES MEASURING
BY THE AUTOCOLLIMATION METHOD
USING A TRIHEDRAL REFLECTOR WITH A CYLINDRICAL FACE**

M. M. Nikitin*, I. A. Konyakhin, F. G. Dobrykh

ITMO University, St. Petersburg, Russia
** nikitinmm96@gmail.com*

Abstract. An algorithm for determining rotation angle of the control element for autocollimation system using the reflector in the form of a trihedral control element with a cylindrical face is proposed. This type of reflector is used to determine the three-dimensional angular spatial position of an object. A mathematical model of the reflector is created, which reproduces its interaction with the radiation. On the basis of obtained images, according to the model, an algorithm for determining the control element rotation angle is developed. The algorithm provides image filtering from noise; reducing the thickness of the lines on the image to improve the accuracy of determining the angle of rotation; imposition of a dark area on the center of the image, for the possibility of subsequent clustering of lines; directly determining the angle of rotation of the lines on the image for the subsequent determination of the angle of rotation of the control element. The algorithm makes it possible to analyze the pattern obtained from a reflector with more than one cylindrical face.

Keywords: autocollimation system, cylindrical surface, image processing algorithm, three-dimensional positioning

For citation: Nikitin M. M., Konyakhin I. A., Dobrykh F. G. Algorithm for object rotation angles measuring by the autocollimation method using a trihedral reflector with a cylindrical face. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 262—270 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-262-270.

Введение. Автоколлимационные системы используются для точного нахождения углов поворота [1, 2]. Согласно [3], автоколлимационные системы эффективны при выполнении следующих задач:

- 1) измерение угловых перемещений частей и блоков крупногабаритных сооружений для контроля точности их сопряжения и обеспечения неизменного взаимного положения [4];
- 2) контроль деформаций и прогибов нагруженных элементов промышленных и транспортных сооружений в режиме реального времени [5];
- 3) установка и юстировка оптических компонентов приборов по автоколлимационным точкам [6, 7].

Типовая схема измерения автоколлимационным методом представлена на рис. 1.

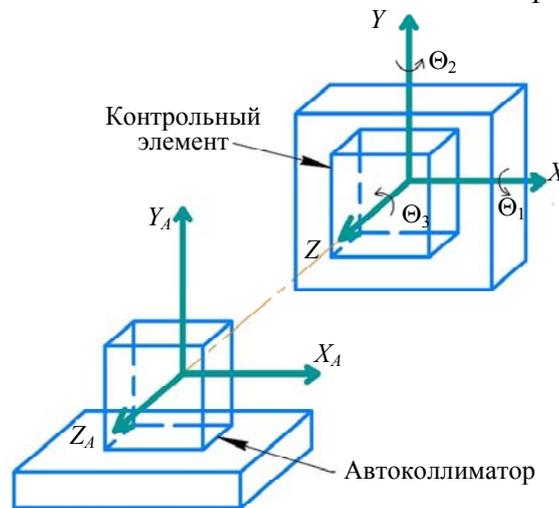


Рис. 1

На базе располагается автоколлиматор с привязанной к нему системой координат $(X_A Y_A Z_A)$, а на контролируемом объекте устанавливается контрольный элемент (КЭ) таким образом, чтобы оси его системы координат X и Y были параллельны соответствующим осям системы координат автоколлиматора, а Z совпадала с осью Z_A . Автоколлиматор измеряет углы поворота КЭ (Θ_1 , Θ_2 , Θ_3) вокруг соответствующих осей.

При этом для определения пространственного углового положения объекта могут использоваться различные схемы оптико-электронных систем. Например, может быть использован сложный контрольный элемент [8], представляющий собой отдельную оптическую систему со светоделительным кубиком, плоским зеркалом и прямоугольной призмой; могут быть использованы схема, в которой два автоколлиматора расположены под углом 90° , или прямоугольная призма с модифицированным автоколлиматором, содержащим двойное количество матриц, светодиодов и специальных тест-объектов и три светоделительных кубика [9]. Однако существует и иное решение — использование схемы, содержащей один автоколлиматор и один контрольный элемент, представляющий собой триэдрический отражатель с цилиндрической гранью [10, 11]. Использование такого отражателя позволит упростить и одновременно удешевить системы, определяющие пространственное угловое положение объекта, а также преодолеть проблему увеличения дистанции [12], которая ограничивает пределы измерения систем, работающих с отражателем в виде плоского зеркала.

Математическая модель. Рассмотрим модель такого контрольного элемента. На рис. 2, а представлена структура отражателя, включающего три отражающие грани. Пусть первая

грань совпадает с координатной плоскостью Z_0OX_0 , вторая — плоскостью Z_0OY_0 , третья грань — цилиндрическая поверхность. Угол между проекцией нормали в плоскость X_0OY_0 и осью X_0 равен α (рисунку соответствует значение 45°). На рис. 2, б представлена приборная система координат XYZ , относительно которой будут измеряться углы поворота.

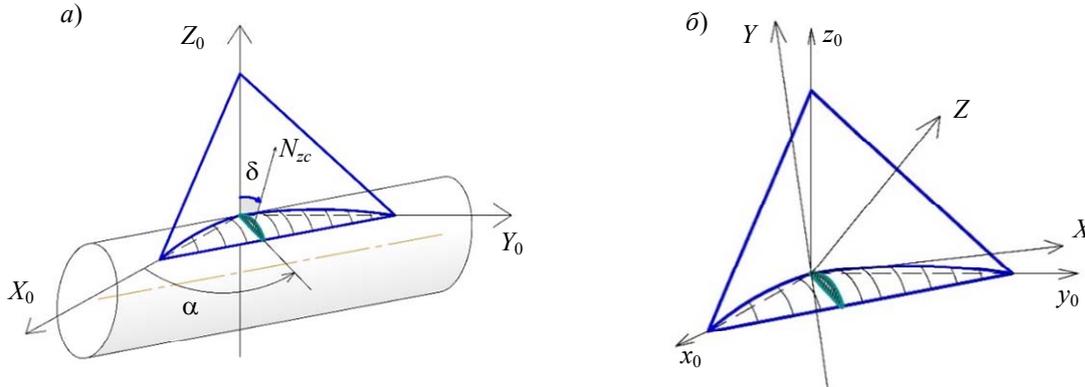


Рис. 2

Матрицы плоских зеркал R_y, R_x , соответствующие граням Z_0OY_0 и Z_0OX_0 , так же как и матрица цилиндрической поверхности R_{zc} , находятся из формул, приведенных в [13]. Матрица действия отражателя для последовательности отражений 1-2-3 будет иметь вид:

$$R_{123} = R_{zc} \cdot R_y \cdot R_x.$$

Матрица переноса в приборную систему координат имеет вид:

$$M_p = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}.$$

Вектор падающего пучка A имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Матрицы поворота вокруг осей приборной системы координат XYZ — $M_{\Theta 1}$ (вокруг оси X), $M_{\Theta 2}$ (вокруг оси Y), $M_{\Theta 3}$ (вокруг оси Z) — описаны в [10]. Таким образом, вектор отраженного пучка будет иметь вид:

$$B_{123\Theta} = M_{\Theta} \cdot M_p \cdot R_{123} \cdot M_p^T \cdot M_{\Theta}^T \cdot A,$$

где вместо M_{Θ} подставляется соответствующая матрица поворота.

Аналогично можно найти вектор отраженного пучка для последовательностей 3-2-1, 1-3-2 и 2-3-1 (здесь указаны все действующие последовательности, так как матрицы R_x, R_y коммутативны и последовательности 2-1-3, 1-2-3 и 3-1-2, 3-2-1 попарно одинаковы).

Для нахождения координат изображения на матричном анализаторе воспользуемся углами рыскания и тангажа (аналогично [14, с. 221]):

$$\psi = \arcsin(B_y),$$

$$\kappa = \arctg\left(\frac{B_x}{B_z}\right),$$

где B_x, B_y, B_z — проекции вектора $B_{123\Theta}$ на соответствующие оси.

Зная углы тангажа и рыскания и задав конкретное фокусное расстояние объектива f , можно найти координаты:

$$Y = ftg\psi, \quad X = ftg\kappa.$$

При $\alpha = 45^\circ$, $f = 100$ мм и $\delta = 0—10^\circ$ (угол поворота нормали на рис. 2, а) изображение, создаваемое в плоскости матричного анализатора, будет иметь вид, представленный на рис. 3.

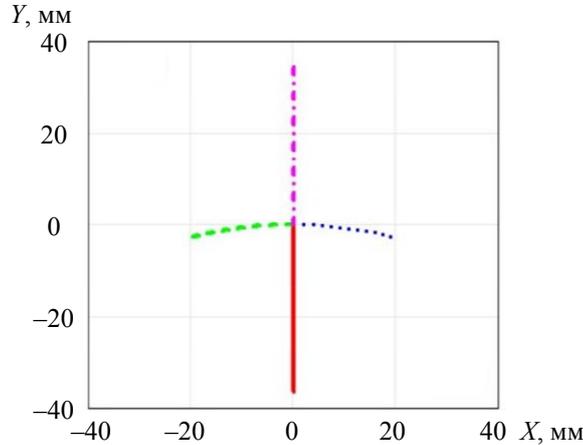


Рис. 3

При этом сплошной кривой соответствуют последовательности 1-2-3 и 2-1-3, штрихпунктирной — 3-2-1 и 3-1-2, штриховой — 1-3-2, а пунктирной — 2-3-1. При различных углах поворота вокруг осей приборной системы координат XYZ части изображения будут поворачиваться на угол, пропорциональный повороту контрольного элемента так, как описано в статье [15]. Эти линии являются дугами эллипсов [10]. Для измерения угла поворота КЭ воспользуемся конструкцией Брейкенриджа—Маклорена, согласно которой через пять точек на плоскости, любые три из которых не лежат на одной прямой, можно провести коническое сечение, притом только одно. При этом формула для данного конического сечения может быть получена из следующего выражения:

$$\begin{vmatrix} x^2 & xy & y^2 & x & y & 1 \\ p_1^2 & p_1q_1 & q_1^2 & p_1 & q_1 & 1 \\ p_2^2 & p_2q_2 & q_2^2 & p_2 & q_2 & 1 \\ p_3^2 & p_3q_3 & q_3^2 & p_3 & q_3 & 1 \\ p_4^2 & p_4q_4 & q_4^2 & p_4 & q_4 & 1 \\ p_5^2 & p_5q_5 & q_5^2 & p_5 & q_5 & 1 \end{vmatrix} = 0,$$

где p, q — координаты точек x, y с 1 по 5, а верхняя строчка — коэффициенты перед соответствующими слагаемыми.

Найдя определитель по указанной формуле, можно получить уравнение эллипса в следующем виде:

$$a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4x + a_5y + 1 = 0,$$

где $a_1—a_5$ — коэффициенты перед соответствующими слагаемыми.

Таким образом можно найти уравнение эллипса, аппроксимирующего линию на изображении, в частности, горизонтальную, а чтобы вычислить угол поворота ξ (рис. 3), необходимо провести касательную к данному эллипсу в точке с координатами $x_0 = 0, y_0 = 0$. Угол поворота касательной определяется по формуле:

$$\xi = \operatorname{arctg} \left(- \frac{a_1 x_0 + \frac{a_2 y_0 + a_4}{2}}{\frac{a_2 x_0}{2} + \frac{a_5}{2} + a_3 y_0} \right).$$

Чтобы определить угол поворота линии на изображении, разобьем ее на пять фрагментов, затем выберем одну случайную точку в каждом из фрагментов и далее, используя конструкцию Брейкенриджа—Маклорена, найдем коэффициенты в уравнении аппроксимирующей данную кривую эллипса, после чего по формуле определим угол поворота. Как было описано выше, за угол поворота дуги эллипса принимается угол поворота касательной к данному эллипсу в точке пересечения кривых, которая является началом координат (рис. 4). Так можно определить угол поворота обеих линий на изображении.

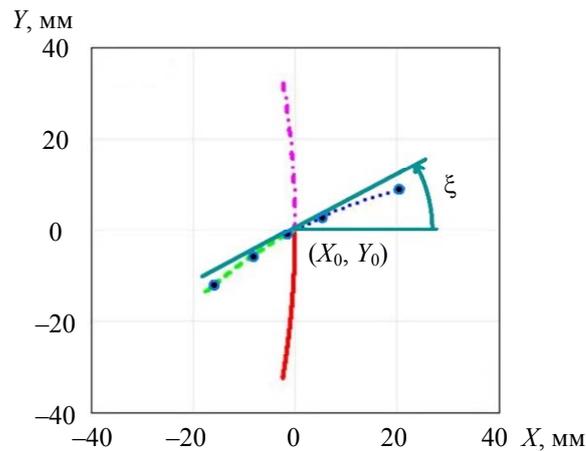


Рис. 4

Разработка алгоритма. Если известно, как определять угол поворота кривой на изображении, возможно составить алгоритм обработки этого изображения. На матричном анализаторе имеется зашумленное изображение светящихся линий. Первый этап состоит в применении операции эрозии (рис. 5, *а* — вид изображения до применения, *б* — после применения эрозии).

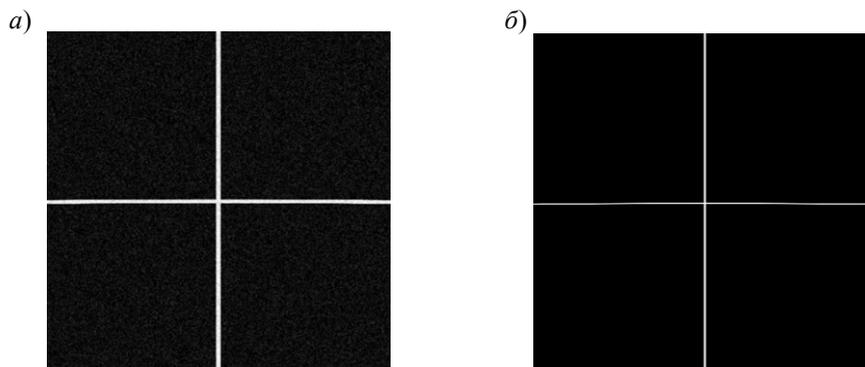


Рис. 5

Данная операция позволит отфильтровать шумы, возникшие на изображении, и одновременно уменьшить толщину линии, что позволит более точно определить угол поворота. В разрабатываемом алгоритме изначальная толщина линии составляет 22 пиксела, после трех итераций операции эрозии с ядром операции 5×5 толщина составляет 10 пикселов. Дальнейшее применение эрозии может спровоцировать полное стирание линии на изображении при повороте, этим обуславливается выбор числа итераций.

Далее на центр изображения накладывается темная область. Это сделано для того, чтобы в дальнейшем можно было произвести кластеризацию и разделить линии для анализа каждой из них отдельно (рис. 6, а). После наложения области производится фильтрация изображения и запись данных в массивы координат.

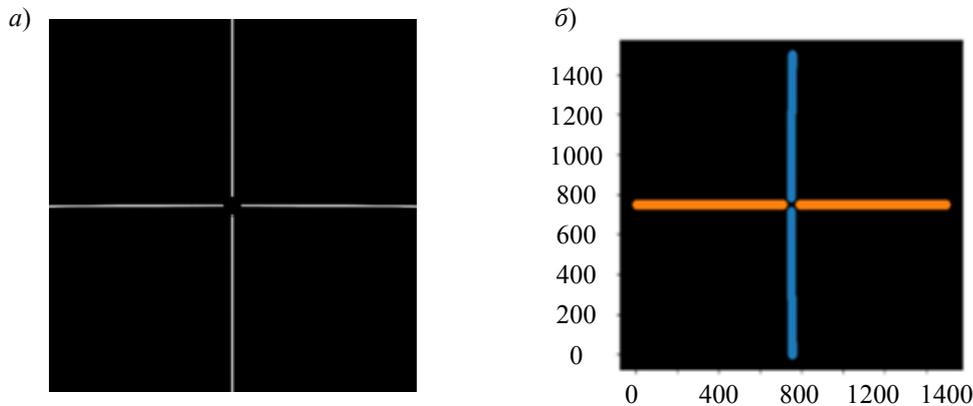


Рис. 6

Затем выполняется кластеризация данных DBSCAN. При использовании кластеризации k-means [16, 17] минимизируется среднее квадратическое отклонение точек от центроидов, и точки линии на изображении оказываются кластеризованы неправильно (при повороте линий часть точек, принадлежащих одной линии, оказываются отнесенными к другой). В отличие от k-means, DBSCAN [18] дает возможность при любом угле поворота определить принадлежность точек заданной линии (рис. 6, б). Применение кластеризации позволяет адаптировать алгоритм для работы с различными конфигурациями цилиндрических граней КЭ (в ситуации, когда изображение состоит больше чем из двух кривых), так как при кластеризации возможно анализировать каждую линию на изображении отдельно.

Следующим шагом является выбор линии для анализа и определения угла ее поворота. Как было описано выше, линия разбивается на пять фрагментов, в которых 10 000 раз выбираются случайные точки и вычисляется угол поворота, после чего выбирается наиболее часто встречающееся значение угла поворота. Данное значение и будет искомым.

Анализ погрешности работы алгоритма. При текущей конфигурации цилиндрической поверхности (одна поверхность, угол $\alpha = 45^\circ$, см. рис. 2, б) измерение угла Θ_1 невозможно, так как линии на изображении не поворачиваются. Поэтому рассмотрим зависимости для остальных углов. При измерении угла Θ_3 линии на изображении повернутся на такой же угол, на который повернут КЭ, так как ось Z перпендикулярна плоскости приемника оптического излучения.

На рис. 7, а приведена зависимость (номинальная) погрешности определения угла поворота Θ_2 от величины этого угла. Можно предположить, что зависимость аппроксимируется параболой, однако отклонения от параболической зависимости велики, в связи с чем было принято решение аппроксимировать данную зависимость полиномом 10-й степени. Полученная зависимость погрешности определения угла приведена на рис. 7, б. Она имеет случайный характер, так как точки для аппроксимации выбираются случайным образом, однако можно заметить, что разброс увеличивается по мере возрастания угла. Это связано с ошибкой аппроксимации, и для достижения таких значений была выбрана данная степень полинома, так как дальнейшее ее увеличение не приведет к значительным результатам.

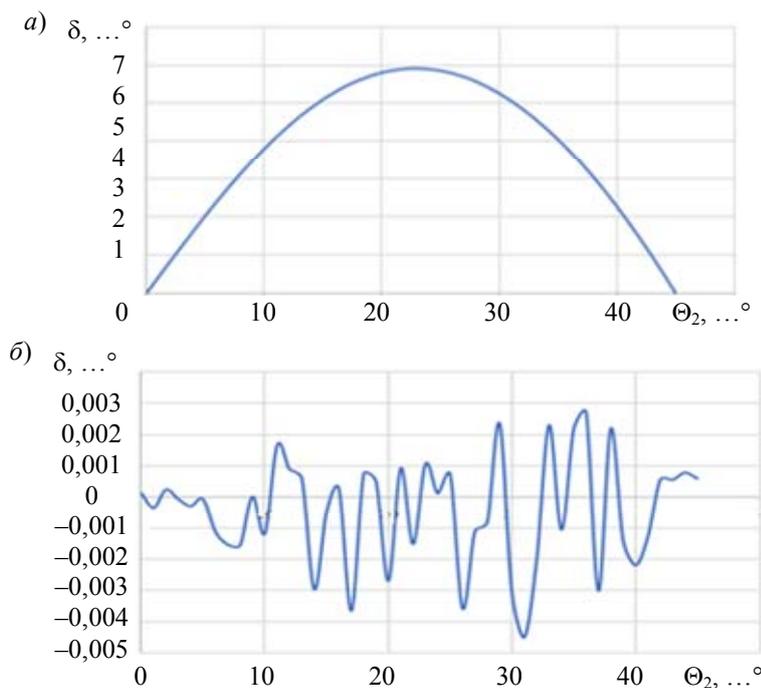


Рис. 7

Следует отметить, что эта зависимость была определена для идеальных условий (точками для вычисления угла поворота являлись координаты, полученные из математической модели КЭ). Рассмотрим теперь погрешность определения углов Θ_2 и Θ_3 при работе алгоритма.

На рис. 8 приведены зависимости погрешности измерения углов от их величины. Среднеквадратическое значение погрешности при определении угла Θ_3 равно $0,034^\circ$ (a), а при Θ_2 — $0,024^\circ$ (б).

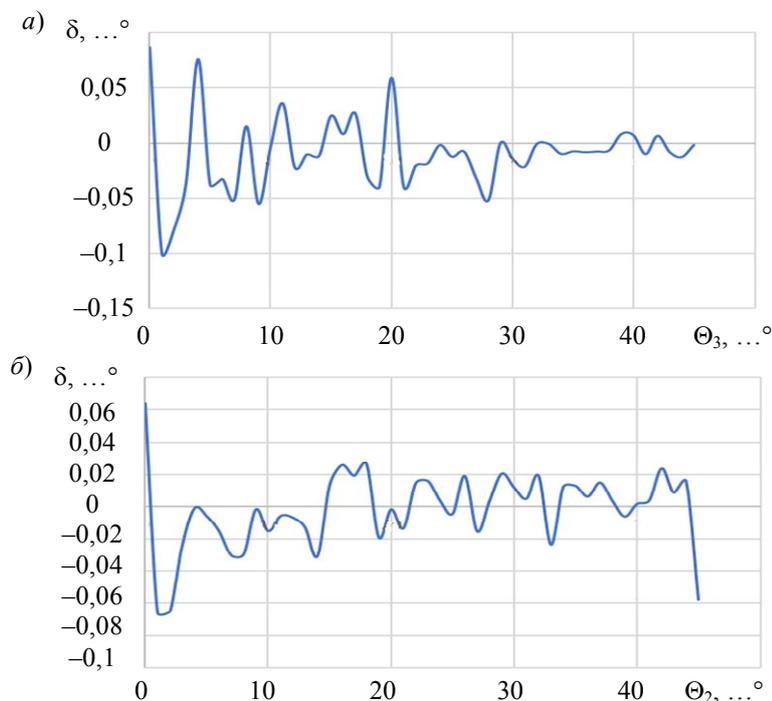


Рис. 8

Для угла Θ_3 погрешность убывает с его увеличением. Это связано с тем, что при повороте линии ее толщина уменьшается, как это было описано выше. Причина, по которой не наблюдается такой же эффект при измерении угла Θ_2 , связана с тем, что при определении данного угла также присутствует погрешность аппроксимации.

Вывод. В настоящей статье предложен алгоритм измерения угла поворота линии на изображении, позволяющий определить трехмерное угловое положение КЭ автоколлимационной системы. Главным недостатком такого подхода является то, что рассматриваемая модель КЭ позволяет определить только два угла поворота. Для определения третьего угла необходима иная конфигурация цилиндрических поверхностей (состоящая из двух граней и изменяющая изображение так, что на нем появляется еще одна линия, по которой можно измерять угол поворота Θ_1). Однако, как было описано в статье, алгоритм может работать с любым количеством линий, соответственно предложенная модель позволит определить полное трехмерное положение КЭ. А также алгоритм может определять углы поворота вплоть до максимальных значений (согласно [19], при угле поворота порядка 20° облученность картины падает до 30 %, а алгоритм способен измерять углы поворота до 45°). При сравнении с диапазоном измерения углов трехкоординатного автоколлиматора [9], который составляет $0,27^\circ$, становится очевидным преимущество разрабатываемой системы. Перспективным подходом дальнейшей разработки является использование „скелетонизации“ изображения для повышения точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникст Д. А., Костантинович К. М., Меськин И. В., Панков Э. Д. Высокоточные угловые измерения. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
2. Arakantsev K. G., Konyakhin I. A., and Timofeev A. N. Inner-base optoelectronic system for the control of linear displacements // Key Engineering Materials. 2010. N 437. P. 237—241.
3. Коняхин И. А., Мусеева А. А., Хоанг В. Оптико-электронный автоколлиматор для двухкоординатных угловых измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 7. С. 563—570.
4. Konyakhin I. A., Timofeev A. N., Usik A. A., and Zhukov D. V. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotatable radio-telescope // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8082. P. 80823R.
5. Дефекты и способы контроля направляющих // Оборудование и Ремонт [Электронный ресурс]: <<http://www.webrarium.ru/korpys-remont-napravlayshih.html>>.
6. Ivanov A. V., Ostrun A. B. Improved universal method for a size calculation of centered optical systems // J. of Optical Technology. 2015. Vol. 79. P. 285—288.
7. Wenchang Y., Zhiqian W., Chengwu S., Yusheng L., Shaojin L., Qinwen L., Wen D., and Zhuoda S. Research on Focal Length Measurement Scheme of Self-Collimating Optical Instrument Based on Double Grating // Sensors (Basel). 2020. Vol. 20, N 9. P. 2718. DOI: 10.3390/s20092718.
8. Пат. 2650432 РФ, G 01 B 11/26, G 02 B 27/30. Трехкоординатный фотоэлектрический автоколлиматор / Е. Р. Маламед, М. Н. Сокольский. Заяв. № 201717103573. Оpubл. 13.04.2018. Бюл. № 11.
9. Yanhe Y., Sheng C., and Yanfeng Q. Design, fabrication, and verification of a three-dimensional autocollimator // Applied Optics. 2016. Vol. 55, N 35. DOI: 10.1364/AO.55.00998.
10. Okoshi T., Yano A., and Fukumori Y. Curved triple-mirror screen for projection-type three-dimensional display // Applied Optics. 1971. Vol. 10, N 3. P. 482—489.
11. Ханох Б. Ю. Оптические отражатели тетраэдрического типа в активных системах. Мн.: Изд-во БГУ, 1982. 160 с.
12. Konyakhin I. A., Timofeev A. N., Konyakhin A. I. Three-axis optic-electronic autocollimation system for the inspection of large-scale objects // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8788. P. 87882C.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Под ред. И. Г. Арамановича. М.: Наука, 1973. 832 с.
14. Никитин М. М. Проектирование оптико-электронной системы измерения координат точек объекта методом пространственного раstra // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ среди бакалавров и специалистов Университета ИТМО. СПб: Университет ИТМО, 2019. С. 217—223.
15. Никитин М. М. Исследование параметров и характеристик автоколлимационной системы при использовании отражателя с цилиндрической гранью // Сб. тр. IX конгр. молодых ученых. СПб, 15—18 апреля 2020 г. 2021. Т. 2. С. 278—283.

16. Старовойтов В. В., Голуб Ю. И. Получение и обработка изображений на ЭВМ. Мн.: БНТУ, 2018. 204 с. ISBN 978-985-550-770-4.
17. Arthur D., Vassilvitskii S. k-means++: The advantages of careful seeding // Proc. of the 18th annual ACM-SIAM symp. on Discrete algorithms. Society for Industrial, Applied Mathematics. 2007. P. 1027—1035.
18. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., and Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proc. Intern. Conf. Knowl. Discovery Data Mining. 1996. Vol. 96, N 34. P. 226—231.
19. Vanderverf D. Applied prismatic and reflective optics. Bellingham: SPIE Press, 2010. 296 p.

Сведения об авторах

- Михаил Михайлович Никитин** — Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; инженер; E-mail: nikitinmm96@gmail.com
- Фёдор Германович Добрых** — Университет ИТМО, факультет цифровых трансформаций; E-mail: d.fedor97@gmail.com
- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Поступила в редакцию 10.12.21; одобрена после рецензирования 18.01.22; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Anikst D.A., Kostantinovich K.M., Meskin I.V., Pankov E.D. *Vysokotochnyye uglovyye izmereniya* (High Precision Angle Measurements), Moscow, 1987, 480 p. (in Russ.)
2. Arakantsev K.G., Konyakhin I.A., and Timofeev A.N. *Key Engineering Materials*, 2010, no. 437, pp. 237–241.
3. Konyakhin I.A., Moiseeva A.A., Hoang V. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 7(59), pp. 563–570 (in Russ.)
4. Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Usik A.A., and Zhukov D.V. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8082, pp. 80823R.
5. <http://www.webrarium.ru/korpys-remont-napravlayshih.html>. (in Russ.)
6. Ivanov A.V., and Ostrun A.B. *J. of Optical Technology*, 2015, vol. 79, pp. 285–288.
7. Wenchang Y., Zhiqian W., Chengwu S., Yusheng L., Shaojin L., Qinwen L., Wen D., and Zhuoda S. *Sensors (Basel)*, 2020, no. 9(20), pp. 2718, DOI:10.3390/s20092718.
8. Patent RU 2650432, G 01 B 11/26, G 02 B 27/30, *Trekhkoordinatnyy fotoelektricheskiy avtokollimator* (Three-coordinate Photoelectric Autocollimator), E.R. Malamed, M.N. Sokolsky, Patent application no. 20717103573, Published 13.04.2018, Bulletin 11. (in Russ.)
9. Yanhe Y., Sheng C., and Yanfeng Q. *Applied Optics*, 2016, no. 35(55), DOI: 10.1364/AO.55.00998.
10. Okoshi T., Yano A., and Fukumori Y. *Applied Optics*, 1971, no. 3(10), pp. 482–489.
11. Khanoh B.Yu. *Opticheskiye otrazhateli tetraedricheskogo tipa v aktivnykh sistemakh* (Optical Reflectors of Tetrahedral Type in Active Systems), Minsk, 1982, 160 p. (in Russ.)
12. Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Konyakhin A.I. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8788, pp. 87882C.
13. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers), Moscow, 1973, 832 p. (in Russ.)
14. Nikitin M.M. *Annotirovannyi sbornik nauchno-issledovatel'skikh vypusknykh kvalifikatsionnykh rabot sredi bakalavrov i spetsialistov Universiteta ITMO* (Annotated Collection of Research Final Qualification Papers among Bachelors and Specialists of ITMO University), St. Petersburg, 2019, pp. 217–223. (in Russ.)
15. Nikitin M.M. *Sbornik trudov IX kongressa molodykh uchenykh* (Proceedings of the IX Congress of Young Scientists), St. Petersburg, April 15–18, 2020, 2021, vol. 2, pp. 278–283. (in Russ.)
16. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. *Polucheniye i obrabotka izobrazheniy na EVM* (Obtaining and Processing Images on a Computer), Minsk, 2018, 204 p., ISBN 978-985-550-770-4. (in Russ.)
17. Arthur D., Vassilvitskii S. *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, Society for Industrial, Applied Mathematics, 2007, pp. 1027–1035.
18. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., and Xu X. *Proc. Intern. Conf. Knowl. Discovery Data Mining*, 1996, no. 34(96), pp. 226–231.
19. Vanderverf D. *Applied prismatic and reflective optics*, Bellingham, SPIE Press, 2010, 296 p.

Data on authors

- Mikhail M. Nikitin** — ITMO University, Faculty of Engineering Research; Engineer; E-mail: nikitinmm96@gmail.com
- Fedor G. Dobrykh** — ITMO University, Faculty of Digital Transformations; E-mail: d.fedor97@gmail.com
- Igor A. Konyakhin** — Dr. Sci, Professor; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Received 10.12.21; approved after reviewing 18.01.22; accepted for publication 28.02.22.

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ

К. В. БАКУРСКИЙ*, А. А. МАКАРОВ, Т. О. МЫСЛИВЦЕВ, С. В. НИКИФОРОВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
*vka@mil.ru

Аннотация. Проанализированы поправки к бортовым шкалам времени (ШВ) навигационных космических аппаратов (НКА), представлены результаты обработки измерений отсчетов ШВ для n выбранных аппаратов при аппроксимации полиномом второго порядка. Разработан метод формирования групповой шкалы времени (ГШВ) радиотехнических комплексов на основе адаптивной полиномиальной аппроксимации данных. Проведено имитационное моделирование предложенного варианта формирования аналитической ГШВ.

Ключевые слова: шкала времени, групповая шкала времени, аппроксимация, ГЛОНАСС, метод наименьших квадратов, целевая функция

Ссылка для цитирования: Бакурский К. В., Макаров А. А., Мысливцев Т. О., Никифоров С. В. Метод формирования групповой шкалы времени радиотехнических комплексов на основе адаптивной полиномиальной аппроксимации данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 271—279. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-271-279

METHOD FOR FORMATION OF GROUP TIME SCALE
OF RADIO ENGINEERING COMPLEXES BASED
ON ADAPTIVE POLYNOMIAL DATA APPROXIMATION

K. V. Bakurskiy*, A. A. Makarov, T. O. Myslivtsev, S. V. Nikiforov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vka@mil.ru

Abstract. Corrections to onboard time scales of navigation space vehicles are analyzed, and results of processing of the time scales readings for n selected spacecrafts using a second-order polynomial approximation, are presented. A method for formation of a group time scale of radio engineering complexes based on adaptive polynomial data approximation is developed. Simulation modeling of the proposed variant of analytical group time scale formation is carried out.

Keywords: time scale, group time scale, approximation, GLONASS, least squares method, objective function

For citation: Bakurskiy K. V., Makarov A. A., Myslivtsev T. O., Nikiforov S. V. Method for formation of group time scale of radio engineering complexes based on adaptive polynomial data approximation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 271—279 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-271-279.

В современных радиотехнических системах в качестве задающих и синхронизирующих устройств используются стандарты частоты и времени (СЧВ), которые являются высокостабильным источником колебаний в радиотехническом диапазоне [1, 2]. В большинстве радиотехнических систем точность и надежность формирования высокостабильных колебаний

обеспечивается методами аналитического (на основе вычислений) и аппаратного (на основе соответствующего преобразования сигналов) объединения СЧВ в групповой эталон [3—6]. При этом точность и стабильность в групповом эталоне достигается на базе усреднения характеристик нескольких часов, а надежность — на основе их резервирования.

Эталоны единиц частоты и времени представляют собой сложные комплексы аппаратуры воспроизведения, хранения и передачи размеров единиц частоты и времени, основу которых составляет групповой хранитель. В состав группового хранителя входят несколько высокостабильных атомных стандартов частоты и времени, оснащенных аппаратурой взаимных сличений по частоте и шкале времени. Причем элементы группового хранителя выполняют не просто функцию горячего резерва некоего основного стандарта, а являются „полноправными членами группы“ и участвуют в формировании выходных единиц эталона. Выходные единицы эталона — групповая частота и шкала атомного времени — обычно являются аналитическими величинами, сформированными на ансамбле хранителей путем статистической обработки данных взаимных сличений между элементами группы. Поэтому стабильность частоты группового хранителя и ход шкалы времени эталона определяются не только метрологическими характеристиками самих хранителей, но и эффективностью статистических методов обработки данных взаимных сличений.

Увеличение автономности функционирования систем синхронизации при одновременном повышении точности формирования и хранения шкал времени в настоящее время все чаще обеспечивается за счет статистических методов обработки временной информации и оптимизации алгоритмов управления, а при аппроксимации измерений значений шкалы времени, формируемой каким-либо стандартом частоты, в основном используется полиномиальная аппроксимация на основе метода наименьших квадратов (МНК) [7—10].

Предлагается на основе поправок к бортовым ШВ НКА сформировать ГШВ радиотехнических комплексов с помощью разработанного метода при реализации адаптивной полиномиальной аппроксимации данных.

В качестве исходных данных для моделирования воспользуемся поправками к бортовым ШВ НКА, передаваемыми в файлах формата RINEX-Clock (рис. 1). Шаг выдачи поправок в файлах формата RINEX-Clock — 5 мин (файл с расширением *.clk) [11—13]. Эти данные вполне пригодны для демонстрации принципа формирования ГШВ на основе предлагаемого метода, так как они имеют характерный линейный тренд, не содержащий экстремумов на суточном интервале. Но также возможно использование и другой информации о шкалах времени, формируемых высокостабильными стандартами частоты.

```

2.00          CLOCK DATA          RINEX VERSION / TYPE
          SVI          29/08/2018 14:17  PGM / RUN BY / DATE
CLK ANT X-OFFSET(M): 11F654 -1.620; 14F113 -2.083  COMMENT
CLK ANT Y-OFFSET(M): 11F654 0.000; 14F113 0.545  COMMENT
THE GLONASS CLOCKS ARE ALIGNED TO GLONASS TIME  COMMENT
THE EPOCHS DATA IN UTC TIME  COMMENT
1 AS          # / TYPES OF DATA
SVI          ANALYSIS CENTER
1 2018 08 18 0 0 0.000000 2018 08 18 23 55 0.000000# OF CLK REF
WTZR        ANALYSIS CLK REF
51          # OF SOLN SATS
G01 G02 G03 G05 G06 G07 G08 G09 G10 G11 G12 G13 G14 G16 G17 PRN LIST
G18 G19 G20 G21 G22 G23 G24 G25 G26 G27 G28 G29 G30 G31 G32 PRN LIST
R01 R02 R03 R04 R07 R08 R09 R10 R11 R13 R14 R15 R16 R17 R18 PRN LIST
R19 R20 R21 R22 R23 R24  PRN LIST
          END OF HEADER
AS G01 2018 08 18 00 00 0.000000 1 -.776701014673E-04
AS G02 2018 08 18 00 00 0.000000 1 .249096578654E-04
AS G03 2018 08 18 00 00 0.000000 1 .123065594623E-03
AS G05 2018 08 18 00 00 0.000000 1 -.313385887984E-05

```

Рис. 1

На рис. 2 представлены поправки Δ к шкалам времени пяти НКА одной из плоскостей орбитального сегмента системы ГЛОНАСС. Выбор космических аппаратов обусловлен наличием положительных и отрицательных трендов ухода ШВ.

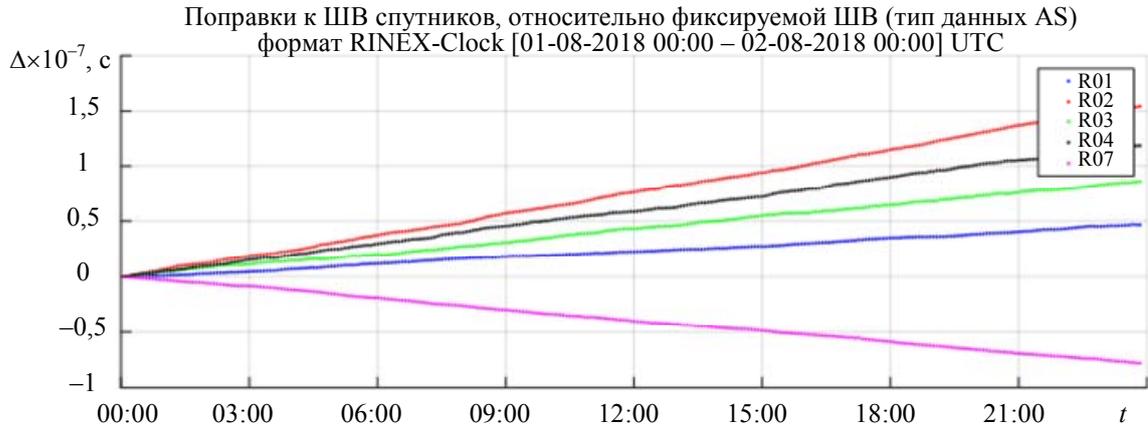


Рис. 2

Для получения оценок коэффициентов полинома по данным о поправках к ШВ НКА (далее — измерения отсчетов ШВ) рассмотрим повторяющиеся отсчеты в формате RINEX-Clock. Приведем соотношения, используемые при полиномиальной аппроксимации данных применительно к выбранным исходным данным.

Пусть

$$y_i = x + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где y_i — измеренные значения отсчетов ШВ; x — истинное значение ШВ, формируемое стандартом частоты; ε_i — ошибки измерений.

С использованием МНК величина x определяется из соотношения

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N (x - y_i)^2 = \min, \quad (2)$$

где N — общее количество измерений отсчетов ШВ.

Основываясь на свойствах центральной предельной теоремы, предположим, что ошибки измерений нормально распределены и имеют нулевое математическое ожидание $m = M\{\varepsilon_i\} = 0$ и дисперсию $D\{\varepsilon_i\} = M\{\varepsilon_i^2\} = \sigma^2$. Тогда вероятность получения каждого из значений отсчетов ШВ y_i пропорциональна

$$f_i(y_i) dy = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y_i - x)^2}{2\sigma^2}\right) dy. \quad (3)$$

Если использовать МНК для получения максимально правдоподобной оценки, в случае нормального распределения оптимальное значение отсчетов ШВ x отыскивается как среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \text{при} \quad \sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sigma^2}{N}. \quad (4)$$

При логарифмировании соотношения (3) максимум функции правдоподобия достигается реализацией соотношения (2):

$$\ln[f_i(y_i)] = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (y_i - x)^2 + \text{const}. \quad (5)$$

Таким образом, для получения оценки по МНК отыскивается минимум соотношения

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (x - y_i)^2 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \varepsilon_i^2 = \min, \quad (6)$$

в котором весовые коэффициенты обратно пропорциональны дисперсиям измерений отсчетов ШВ, и оптимальная величина x отыскивается как

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} y_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \text{ при } \sigma^2(\bar{x}) = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-1}. \tag{7}$$

Величина

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} (x - y_i)^2 \tag{8}$$

имеет распределение χ -квадрат с $(N - 1)$ степенями свободы.

Представим повторяющиеся измерения отсчетов ШВ при полиномиальной аппроксимации $y = Ax + \varepsilon$, (9)

где y — вектор измеренных значений отсчетов ШВ; x — вектор оцениваемых параметров (коэффициентов полинома); A — матрица связи измеренных значений отсчетов ШВ с коэффициентами полинома; ε — вектор ошибок измерений.

С использованием линейной и произвольной полиномиальной аппроксимации выражение (8) запишется как

$$y = \begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} + \varepsilon \text{ и } y = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^{m-1} \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & t_N & t_N^2 & \dots & t_N^{m-1} \end{bmatrix}^{N \times m} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} + \varepsilon. \tag{10}$$

При известной корреляционной матрице ошибок измерений оценка коэффициентов аппроксимирующего полинома отыскивается из соотношения

$$x = (A^T R_y A)^{-1} A^T R_y y. \tag{11}$$

Из полученного соотношения определяется ковариационная матрица оценки коэффициентов полинома: $K_{\bar{x}} = (A^T R_y A)^{-1}$. Корень квадратный из диагональных элементов этой матрицы определяет среднеквадратические значения ошибок оценки коэффициентов полинома.

В таблице представлены результаты обработки измерений отсчетов ШВ для пяти выбранных аппаратов при аппроксимации полиномом второго порядка.

Номер НКА [m]	Аппроксимирующая полиномиальная функция $y_{R0m} = a_2^{R0m} \cdot t^2 + a_1^{R0m} \cdot t + a_0^{R0m}$
R01	$y_{R01} = 2,5288 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 1,0029 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,021141$
R02	$y_{R02} = 8,1675 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 3,4747 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,070014$
R03	$y_{R03} = 4,6496 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 1,8078 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,038602$
R04	$y_{R04} = 6,3143 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 + 2,6352 \cdot 10^{-08} \cdot t - 0,053752$
R07	$y_{R07} = -4,2308 \cdot 10^{-14} \cdot t^2 - 1,7141 \cdot 10^{-08} \cdot t + 0,035635$

Уточнить исходные результаты измерений возможно, подставив полученную оценку \bar{x} в исходное выражение (8):

$$\bar{y} = A(A^T R_y A)^{-1} A^T R_y y, \tag{12}$$

тогда ковариационная матрица уточненных значений результатов измерений

$$K_{\bar{y}} = A(A^T R_y A)^{-1} A^T R_y. \tag{13}$$

На рис. 3 представлены графики аппроксимирующих полиномов с СКО результатов.

Аппроксимированные значения поправок к ШВ спутников
[01-08-2018 00:00 – 02-08-2018 00:00] UTC

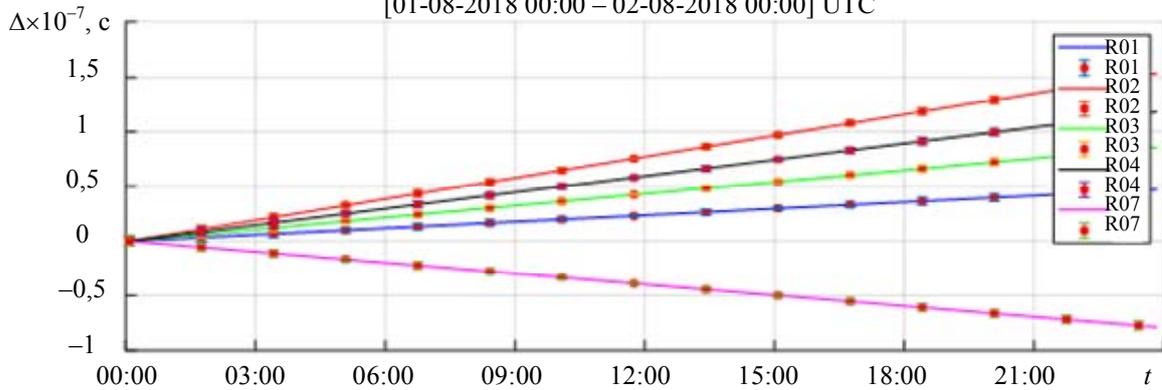


Рис. 3

Для формирования ГШВ каждому аппроксимирующему полиному необходимо добавить весовой множитель -1 или 1 , который „отражает“ полученную полиномиальную функцию относительно оси времени либо „не отражает“ ее.

Полиномиальная функция для ГШВ отыскивается как результирующая сумма взвешенных значений полученных полиномов. Очевидно, что для пяти выбранных стандартов (либо большего количества) используемых данных об уходах ШВ необходимо 2^5 или 2^m вариантов задания весовых коэффициентов. В результате полного перебора значений весовых множителей отыскивается минимум целевой функции

$$F(a_0^{R0k}, a_1^{R0k}, a_2^{R0k}, faktor(k)) = \text{abs} \left[\sum_{k=1}^m [faktor(k) \cdot (a_2^{R0k} \cdot t^2 + a_1^{R0k} \cdot t + a_0^{R0k})] \right] \rightarrow \min, \tag{14}$$

где $faktor(k)$ — весовой множитель для каждой полиномиальной функции; $\text{abs}[\cdot]$ — абсолютное значение взвешенной суммы.

Одним из вариантов полного перебора значений может быть присвоение $faktor(k) = 1$ или $faktor(k) = -1$ при переборе чисел от 0 до 2^m в двоичной форме. Например, для пяти выбранных стандартов, формирующих ГШВ, имеем 32 варианта значений весовых множителей

$$\begin{aligned} 00:00000 & faktor(11111), \\ 01:00001 & faktor(1111-1), \\ \dots & \\ 13:01101 & faktor(1-1-11-1), \\ \dots & \\ 30:11110 & faktor(-1-1-1-11), \\ 31:11111 & faktor(-1-1-1-1-1). \end{aligned} \tag{15}$$

На рис. 4 представлены результаты поиска минимума целевой функции F (14); показано, что минимум достигается при 14-м и 19-м вариантах выбора весовых коэффициентов n_k . Эти условия определяют вид результирующей полиномиальной функции для ГШВ: возрастающей либо убывающей во времени [13—15]. Для определенности примем в качестве полинома, аппроксимирующего ГШВ, возрастающую функцию.

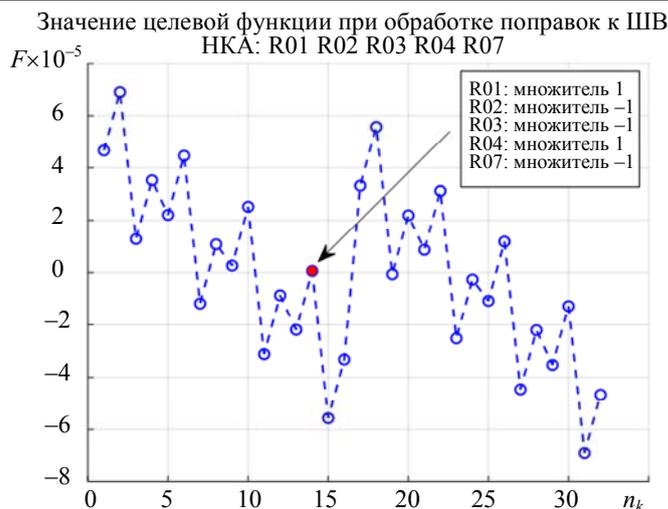


Рис. 4

Таким образом, полиномиальная функция второго порядка для формирования аналитической ГШВ отыскивается из соотношения

$$y_{ГШВ} = \sum_{k=1}^m [faktor(k) \cdot (a_2^{R0k} \cdot t^2 + a_1^{R0k} \cdot t + a_0^{R0k})], \tag{16}$$

при условии $F(a_0^{R0k}, a_1^{R0k}, a_2^{R0k}, faktor(k)) \rightarrow \min$.

На рис. 5 представлены аппроксимирующие полиномы после присвоения весовых коэффициентов и полином для ГШВ; на рис. 6 — значения целевой функции при обработке поправок к ШВ (а) и аналитическая ГШВ после обработки данных (б).

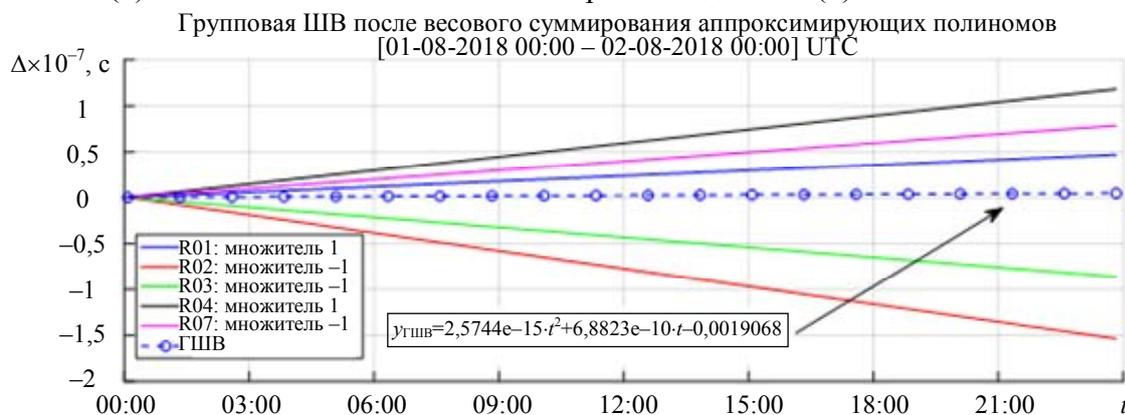


Рис. 5

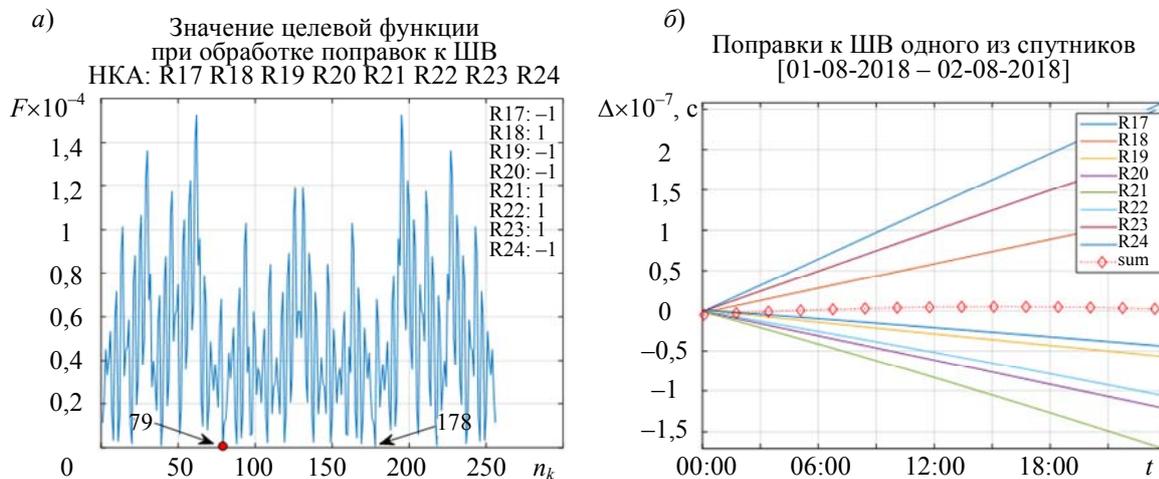


Рис. 6

Заключение. Радиотехнические системы с распределенной инфраструктурой, имеющие в своем составе комплексы, „завязанные“ на единую ШВ, требуют поддержания собственной (не зависящей от внешних систем синхронизации) ШВ, которая должна формироваться в едином центре данных на основе аналитической ГШВ. При наличии такой сетевой инфраструктуры в случае пропадания сигналов от систем внешней синхронизации или внезапного вывода из строя одного из элементов возможно использовать данные от собственной аналитической ГШВ, что существенно повысит стабильность выполнения поставленных перед системой задач.

На основе полученных результатов моделирования предложенного варианта формирования аналитической ГШВ можно сделать следующие выводы.

1. При аппроксимации измеренных значений ШВ полиномиальной функцией для дальнейшего формирования аналитической ГШВ важными факторами являются: качество аппроксимации на заданном интервале времени (например, с проверкой по критерию согласия χ -квадрат), с обязательным условием аппроксимации значений для всех используемых ШВ полиномов одинаковой степени.

2. Для формирования аналитической ГШВ в реальном масштабе времени необходимо накапливать данные измерений на интервале, достаточном для качественной аппроксимации (см. п. 1). Дальнейшее формирование ШВ проводится при обработке данных в скользящем окне, при этом выбор размеров окна может быть динамическим и зависеть от характеристик выбранных однотипных стандартов частоты, формирующих шкалы времени.

3. Для выбора каждого из множителей ($faktor(k)$) полиномиальных функций при формировании аналитической ГШВ возможно использовать различные варианты, но ввиду ограниченного числа стандартов частоты в группе полный перебор вариантов должен быть обязательным.

4. Перспективным направлением дальнейших исследований является формирование аналитической ГШВ на основе калмановской фильтрации данных измерений, что позволит формировать ГШВ без накопления данных в выбранном окне, с возможностью применения предложенного метода к однотипным стандартам частоты различного класса точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: Итоги развития за пятнадцать лет // ТИИЭР. 1978. Т. 66, № 9. С. 70—101.
2. Андрианов В. И., Балыков Ю. Ю., Беспалов А. Н. и др. Служба и средства измерения времени. Л.: МО, 2000. 152 с.
3. Хрусталева Ю. П. Статическая и динамическая обработка данных, получаемых в процессе ведения эталонов времени и частоты // Измерительная техника. 2004. № 6. С. 20—24.
4. Алешкин А. П., Макаров А. А., Мысливцев Т. О. Предложения по созданию единой шкалы времени на основе данных пространственно-распределенных стандартов частоты различной точности // Тр. Института прикладной астрономии РАН. СПб: ИПА РАН, 2016. Вып. 37. С. 19—22.
5. Донченко С. И., Крошкин А. Н. Новый подход к формированию групповой частоты и шкалы атомного времени на ансамбле хранителей // Измерительная техника. 1999. № 7. С. 3—6.
6. Ермишин С. М. Теоретические основы создания групповых средств измерений // Измерительная техника. 2000. № 2. С. 11—15.
7. Алёшкин А. П. Основы теории адаптивного смещенного оценивания с нелинейными ограничениями и ее применение к решению некорректных навигационных задач. СПб: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 2001. 153 с.
8. Степанов М. Г. Введение в теорию смещенного оценивания параметров движения космических аппаратов по ограниченному данным. СПб: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1993. 135 с.
9. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.

10. Алёшкин А. П., Архипова И. Г., Макаров А. А., Полиенко В. Н., Семёнов А. А. Метод рекуррентного оценивания параметров движения подводного объекта по данным космических навигационных определений буксируемой аппаратуры потребителя // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 57—62.
11. Архивные данные прикладного потребительского центра ГЛОНАСС // Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения [Электронный ресурс]: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/SVOEVP/2018/clock/> (дата обращения: 16.11.2020).
12. Описание формата файлов часов // Сервер информационной системы центрального бюро Международного геофизического сообщества (IGS Central Bureau Information System) [Электронный ресурс]: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex_clock.txt> (дата обращения: 16.11.2020).
13. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
14. Аоки М. Введение в методы оптимизации. М.: Наука, 1977. 343 с.
15. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Учеб. для вузов. М.: Мир, 1975. 536 с.

Сведения об авторах

- Клим Валерьевич Бакурский** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru
- Андрей Александрович Макаров** — д-р техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru
- Тимофей Олегович Мысливцев** — д-р техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru
- Сергей Валерьевич Никифоров** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 22.10.21; одобрена после рецензирования 18.01.22; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Rytman Zh. *Trudy Instituta Inzhenerov po Elektrotekhnike i Radioelektronike*, 1978, no. 9(66), pp. 70–101. (in Russ.)
2. Andrianov V.I., Balykov Yu.Yu., Bepalov A.N. et al. *Sluzhba i sredstva izmereniya vremeni* (Service and Means of Measuring Time), Leningrad, 2000, 152 p. (in Russ.)
3. Khrustalev Yu.P. *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2004, no. 6, pp. 20–24. (in Russ.)
4. Aleshkin A.P., Makarov A.A., Myslivtsev T.O. *Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2016, no. 37, pp. 19–22. (in Russ.)
5. Donchenko S.I., Kroshkin A.N. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1999, no. 7, pp. 3–6. (in Russ.)
6. Ermishin S.M. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2000, no. 2, pp. 11–15. (in Russ.)
7. Aleshkin A.P. *Osnovy teorii adaptivnogo smeshchennogo otsenivaniya s nelineynymi ogranicheniyami i yeye primeneniye k resheniyu nekorrektnykh navigatsionnykh zadach* (Fundamentals of the Theory of Adaptive Biased Estimation with Nonlinear Constraints and Its Application to Solving Ill-Posed Navigation Problems), St. Petersburg, 2001, 153 p. (in Russ.)
8. Stepanov M.G. *Vvedeniye v teoriyu smeshchennogo otsenivaniya parametrov dvizheniya kosmicheskikh apparatov po ogranichennym dannym* (Introduction to the Theory of Biased Estimation of Spacecraft Motion Parameters from Limited Data), St. Petersburg, 1993, 135 p. (in Russ.)
9. Sobol I.M. *Metod Monte-Karlo* (Monte Carlo Method), Moscow, 1968, 64 p. (in Russ.)
10. Aleshkin A.P., Polonchik O.L., Nevzorov V.I., Vladimirov V.V. *Radio Industry*, 2018, no. 1, pp. 57–62. (in Russ.)
11. ftp://ftp.glonass-iac.ru/SVOEVP/2018/clock/. (in Russ.)
12. ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex_clock.txt. (in Russ.)
13. Perov A.I., Kharisov V.N., ed., *GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of Construction and Operation), Moscow, 2010, 800 p. (in Russ.)
14. Aoki M. *Introduction to Optimization Techniques*, NY, Macmillan, 1971.
15. Himmelblau D.M. *Applied Nonlinear Programming*, NY, McGraw-Hill, 1972.

Data on authors

- Klim V. Bakurskiy** — PhD, Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru

- Andrey A. Makarov** — Dr. Sci., Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Timofey O. Myslivtsev** — Dr. Sci., Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Sergey V. Nikiforov** — PhD, Associate Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru

Received 22.10.21; approved after reviewing 18.01.22; accepted for publication 28.02.22.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАРЫ ТРЕНИЯ ТИПА „ДИСК ПО ДИСКУ“

Л. В. ЕФРЕМОВ^{1*}, А. В. ТИКАЛОВ²

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

²АО „Компрессор“, Санкт-Петербург, Россия

* levlefr@mail.ru

Аннотация. Предложены алгоритмы оценки износа пары трения качения с проскальзыванием типа „диск по диску“ при испытаниях на машине трения СМЦ-2. Приведены три варианта режима проскальзывания дисков при моделировании трения скольжения и качения на примере основных видов повреждений зубчатых передач. В основу алгоритмов расчета линейной и объемной износостойкости дисков, в случае трения скольжения от проскальзывания, положен метод block-on-ring. Работа актуальна для изучения факторов, влияющих на износ. Предложенная и обоснованная методика готова к применению при испытаниях пар трения типа „диск по диску“.

Ключевые слова: износ, износостойкость, диск, образец, сегмент, трение, хорда, диск по диску

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Экспериментальная оценка износостойкости пары трения типа „диск по диску“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 280—286. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-280-286.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF A DISK-ON-DISK FRICTION PAIR

L. V. Efremov^{1*}, A. V. Tikalov

¹Institute of Mechanical Engineering Problems of the RAS, St. Petersburg, Russia

²JSC "Compressor", St. Petersburg, Russia

levlefr@mail.ru,

Abstract. Algorithms for estimating the wear of a rolling friction pair with slippage of the “disk on disk” type during tests on an SMC-2 friction machine are proposed. Three variants of the disc slip mode are given when simulating sliding and rolling friction on the example of main types of damage to gears. The algorithms for calculating the linear and volumetric wear resistance of discs, in the case of sliding friction against slippage, are based on the block-on-ring method. The work is supposed to be relevant for studying wear affecting factors. The proposed and substantiated technique is ready for use in testing friction pairs of the “disk-on-disk” type.

Keywords: wear, wear resistance, disc, sample, segment, friction, chord, ring on ring

For citation: Efremov L. V., Tikalov A. V. Experimental evaluation of the wear resistance of a disk-on-disk friction pair. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 280—286 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-280-286.

Введение. При испытаниях образцов материалов на износ широко применяются трибометры типа СМЦ-2, оснащенные парами трения скольжения и качения [1]. Наиболее эффективные пары трения скольжения типа „брусочек по диску“, или „block-on-ring“ [2], состоят из изнашиваемого образца в виде плоского бруска 2 и изнашивающего его диска 1 (рис. 1, а). У пары трения качения типа „диск по диску“, или „ring-on-ring“ (RR), изнашиваемый образец представляет собой вращающийся диск 2, который может проскальзывать относительно сопрягаемого с ним диска 1 (рис. 1, б—г) [1].

При трении скольжения износ образца Δh проявляется в виде некоторого уменьшения его размеров и массы за назначенное время сеанса испытаний, что позволяет оценивать

линейную ε_L и объемную ε_W износостойкость как характеристику трибологических свойств пар трения.

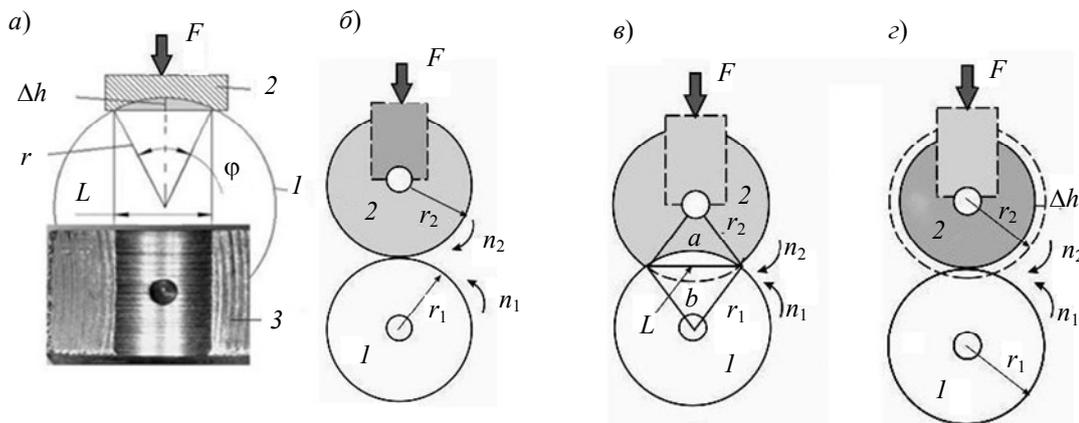


Рис. 1

Решение этой задачи можно показать на примере измерения износов методом block-on-ring при изнашивании прямоугольного бруска шириной H_k , в плоскость которого врежется диск радиусом r , образуя износ в виде сегмента с хордой (длиной L) на поверхности за время сеанса испытаний t (рис. 1, а). На брусок действует постоянная нагрузка F , а диск вращается с частотой n . Тогда переменное удельное давление на образец $P=F/D$ (МПа), где $D=H_k L$ (мм²) — площадь пятна контакта. При вращении диска относительно неподвижного образца каждая точка контакта совершает путь трения $S=2\pi rnt$ (мм), что соответствует работе трения $A=10^{-3}FS$ (Н·м) [1].

Как видно из рис. 1, а, переменная длина хорды L определяется любым мерительным инструментом. При этом она является аргументом всех функций, входящих в алгоритм расчета упрощенного варианта метода block-on-ring.

Линейная износостойкость ε_L представляет собой отношение пути трения S к линейному износу Δh (мм) за время сеанса испытаний t , а объемная износостойкость ε_W (Н·м/мм³) — это отношение работы трения A (Н·м) к объему продуктов износа W (мм³) за то же время.

В соответствии со стандартом ASTM G77 метода block-on-ring предусматривается оценка только объемной износостойкости ε_W . Для этого была получена формула расчета объема продуктов износа W [2—4]:

$$W = \left[r^2 \arcsin\left(\frac{L}{2r}\right) - \frac{L}{2} \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right] H_k \rightarrow \left(\frac{L^3}{12r} + \frac{L^5}{160r^3} + \frac{3L^7}{3584r^5} \dots \right) H_k \approx \frac{L^3}{12r} H_k, \quad (1)$$

которая была упрощена в зависимости от длины хорды L с погрешностью не более 2—3 % путем разложения точного выражения (1) в ряд Тейлора. Отсюда следует упрощенная функция линейного износа Δh от хорды L :

$$\Delta h = W/D = W/LH_k \approx \frac{L^2}{12r}. \quad (2)$$

Таким образом, получены все переменные, необходимые для перехода от функции объемной износостойкости ε_W :

$$\varepsilon_L = \frac{S}{\Delta h} = \frac{10^3 A/F}{W/D} = \frac{10^3 A/W}{F/D} = 1000 \frac{\varepsilon_W}{P} \quad (3)$$

к функции линейной износостойкости ε_L

$$P = F/D = F/LH_k; \quad (4)$$

с учетом формул (2) и

$$\varepsilon_W = A/W = 10^{-3} FS/W \quad (5)$$

для износа Δh и давления P . Отметим, что формула (4) является универсальным законом для сравнительной оценки износостойкости материалов по ГОСТ 23.001-2004* как при постоянном, так и переменном давлении (вне зависимости от способа проведения испытаний).

На рис. 1, б—г показаны три варианта эскиза для трех вариантов работы пары трения „ring-on-ring“ с учетом коэффициента проскальзывания k_k . Учет проскальзывания поверхности контакта имеет принципиальное значение для расчета износа пары трения „ring-on-ring“. В общем случае величина линейного износа зависит от остаточного пути трения пятна контакта ΔS и коэффициента скольжения k_p , которые определяются по формулам:

$$\Delta S = 2 \pi t |r_1 n_1 - r_2 n_2| = 2 \pi r_1 n_1 t \left| 1 - \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} \right| = 2 \pi r_1 n_1 t k_k; \quad (6)$$

$$k_k = \left| 1 - \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} \right|. \quad (7)$$

Режим пары трения рис. 1, б (без проскальзывания) соответствует варианту, когда $n_1 r_1 = n_2 r_2$ и $k_k = 1 - 1 = 0$. Этот вариант соответствует режиму трения качения, когда повреждения поверхности возникают в виде каверн из-за действия знакопеременных напряжений в масляном слое, подробное рассмотрение которых не входит в рамки задач настоящей работы.

Если целью испытаний модели „ring-on-ring“ является оценка износостойкости материала диска 2, то следует применить схему пары трения рис. 1, в (при неподвижном состоянии диска), когда $n_2 r_2 = 0$, а $k_k = 1 - 0 = 1$. В этом случае наблюдаются чистое скольжение и полный линейный износ без признаков трения качения. Поэтому появляется возможность оценивать износостойкость материала по методу block-on-ring с учетом того, что диск 1 врезается не в плоскую, а в круглую поверхность диска 2. Как видно из рис. 1, в, площадь врезания состоит из двух пересекающихся сегментов a и b с общей хордой L . Объем износа каждой части сегмента можно определить по формуле (1), а затем рассчитать общий суммарный износ по формуле:

$$W = W_a + W_b \approx \frac{L^3 H_k}{12} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (8)$$

Далее, используя площадь пятна контакта D , определяем линейный износ Δh и удельное давление P (МПа), а затем рассчитываем объемную ε_W и линейную ε_L износостойкость по формулам:

$$\Delta h = W/D = W/L H_k \approx \frac{L^2}{12} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right); \quad (9)$$

$$P = F/D = F/L H_k; \quad (10)$$

$$\varepsilon_W = A/W = 10^{-3} F S/W = 10^{-3} F 2 \pi r_1 n_1 t (1+0)/W; \quad (11)$$

$$\varepsilon_L = 1000 \frac{\varepsilon_W}{P}. \quad (12)$$

Из сравнения расчета параметров по формулам (1)—(5) и (8)—(12) можно заметить, что метод block-on-ring является частным случаем метода ring-on-ring (см. рис. 1, в) при $r_2 \rightarrow \infty$ и $1/r_2 \rightarrow 0$. Это позволяет сравнить их при одинаковых исходных данных (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные							
L , мм	H_k , мм	n , об/мин	F , Н	t , мин	S , мм	A , Нм	D , мм ²
4	10	100	200	10	$1,57 \cdot 10^5$	$3,142 \cdot 10^4$	40

* Р 50—95—88. Рекомендации по обеспечению износостойкости изделий. Основные положения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989.

Результаты расчета по программе MATHCAD приведены в табл. 2, из которой следует, что по сравнению с рис. 1, а (метод block-on-ring) вариант рис. 1, в (метод ring-on-ring) за одно и то же время показывает более высокий износ (4,8 мм³ против 2,1 мм³) и соответственно меньшую износостойкость (1,31 10⁶ против 2,95 10⁶).

Таблица 2

Результаты расчета параметров износостойкости								
Вариант	$R_{1,2}$, мм	W , мм ³	Δh , мм	P , МПа	ε_{II} , Нм/мм ³	ε_L , мм/мм	θ	НВ, МПа
Рис. 1, в	20	4,8	0,12	5	6545	1,31 10 ⁶	2,6	58
Рис. 1, а	25	2,1	0,05	5	14630	2,95 10 ⁶	3,1	98

Различие износостойкости рассмотренных вариантов пар трения можно объяснить разной твердостью материала исследуемых образцов. Значения твердости по шкале Мооса θ и Бринелля НВ (МПа), определенные по [5], приведены в табл. 2:

$$\theta = k_o \left(10^{-6} \varepsilon_L \right)^{0,25}; \quad (13)$$

$$\text{НВ} = 5 \theta^{2,5}. \quad (14)$$

В формуле (13) коэффициент $k_o = 2,4$ при граничном трении со смазкой, $k_o = 1,4$ — при сухом абразивном трении. Отсюда следует, что при одинаковых хорде $L = 4$ мм, частоте вращения $n = 100$ об/мин и времени испытаний $t = 10$ мин наименьшая твердость материала НВ = 58 МПа наблюдается у варианта рис. 1, в ввиду большего объема продуктов износа $W = 4,8$ мм³. Вариант рис. 1, в рекомендуется применять для определения свойств материала диска. Для более твердых материалов необходимо „усилить“ режим испытаний. Например, при $n = 800$ об/мин появляется возможность испытывать материал при твердости до НВ = 250 МПа (сталь).

Такой возможности нет при использовании общего варианта рис. 1, з для метода ring-on-ring с разным коэффициентом проскальзывания при $n_1 r_1 > n_2 r_2 > 0$ и $0 < k_k < 1$, поскольку износу подвергается вся круговая поверхность диска 2. Тогда объемный износ второго диска будет равен объему W изношенного слоя, толщиной Δh мм (линейный износ). Величина W определяется по формуле

$$\begin{aligned} W &= \frac{\varphi}{2} \left(r_2^2 - (r_2 - \Delta h)^2 \right) H_k = \frac{\varphi}{2} (r_2^2 - r_2^2 + 2 \Delta h r_2 - \Delta h^2) = \\ &= \frac{\varphi}{2} \left(2 - \frac{\Delta h}{r_2} \right) r_2 H_k \Delta h \approx 2 \pi r_2 H_k \Delta h = D \Delta h \end{aligned} \quad (15)$$

с учетом угла $\varphi = 2\pi$ рад и площади пятна контакта D

$$D = 2 \pi r_2 H_k \quad (16)$$

или методом взвешивания образца по формуле $W = \Delta G / \gamma$, где ΔG (мг) — масса изношенного материала, γ (мг/мм³) — плотность материала.

К указанным вариантам оценки объема W относятся соответствующие способы определения линейного износа Δh (мм): при ином методе взвешивания он рассчитывается по (15) с учетом площади пятна контакта D (14):

$$\Delta h = \frac{W}{D} = \frac{W}{2 \pi r_2 H_k}. \quad (17)$$

При инструментальном способе измерений величину Δh можно оценить методом искусственных баз с применением сверла [6]. Площадь пятна контакта D также применяется с целью расчета удельного давления P

$$P = \frac{F}{D} = \frac{F}{2 \pi r_2 H_k}. \quad (18)$$

Искомое значение объемной износостойкости устанавливается по формуле

$$\varepsilon_W = \frac{10^{-3} F \Delta S}{W} = \frac{2 \cdot 10^{-3} F \pi r_1 n_1 t}{2 \pi r_2 H_k \Delta h} k_k = 10^{-3} \frac{F n_1 t}{H_k \Delta h} \frac{r_1}{r_2} \left[1 - \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} \right] \quad (19)$$

с учетом остаточного пути трения ΔS (6) из-за скольжения:

Два варианта оценки линейной износостойкости ε_L и ε_l отражают формулы

$$\varepsilon_L = 1000 \frac{\varepsilon_W}{P}, \quad (20)$$

$$\varepsilon_l(k_k) = \frac{\Delta S}{\Delta h} = \frac{2 \pi r_1 n_1 t}{\Delta h} k_k = \frac{2 \pi r_1 n_1 t}{\Delta h} \left[1 - \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} \right]. \quad (21)$$

Выражения (20) и (3) служат законом взаимосвязи линейной и объемной износостойкости, который позволяет использовать ГОСТ 23.001–2004 для сравнительного тестирования материалов при измерении износа методом взвешивания [3]. Исходные данные для расчета износостойкости пары трения типа рис. 1, 2 приведены в табл. 3. При определении ε_L и ε_l по формулам (20) и (21) результаты совпадают, как это показано в табл. 4.

На рис. 2 приведены зависимости износостойкости ε_l (21) и твердости по Моосу θ (13) от коэффициента скольжения k_k (7). Графики подтверждают, что при $k_k=0,7$ износостойкость $\varepsilon_L=\varepsilon_l=4,4 \cdot 10^7$ (кривая 1), а $\theta=6,181$ (2).

Таблица 3

Исходные данные							
r_2 , мм	r_1 , мм	H_k , мм	Δh , мм	F , Н	n_1 , об/мин	n_2 , об/мин	t , мин
25	25	10	0,01	200	200	60	20

Таблица 4

Результаты расчета параметров износостойкости						
D , мм ²	W , мм ³	P , МПа	ε_W , Нм/мм ³	ε_L , мм/мм	k_k	θ
$1,57 \cdot 10^3$	15,708	0,127	$5,6 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^7$	0,7	6,181

Исходные данные табл. 3 для проведения испытаний пар трения типа рис. 1, 2 определяются следующим образом: радиус дисков r_1 и r_2 — путем измерений мерительным инструментом, износ Δh — методом искусственных баз [7], нагрузка F — с помощью органов управления машины трения, время t — установкой хронометра в режиме будильника.

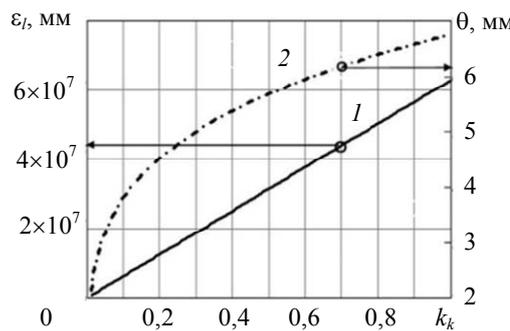


Рис. 2

Для оценки частоты вращения n_1 и n_2 (об/мин) целесообразно применять стробоскопы, например, testo-476 типа trobe™ (рис. 3) [7], который позволяет измерять частоту вращения в диапазоне от 30 до 12 500 об/мин (вспышек в минуту).



Рис. 3

В заключение целесообразно проанализировать особенности практического применения рассмотренных вариантов пар трения типа „ring-on-ring“: рис. 1, б при $k_p=0,1$; рис. 1, в при $k_p=1$ и рис. 1, г при $0 < k_p < 1$.

Согласно описанию машины СМЦ-2, пара трения типа „диск по диску“ предназначена для изучения повреждений некоторых устройств, например зубчатых передач [1]. На рис. 4 показаны их характерные дефекты: а — скол зубьев; б — усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев; в — изнашивание поверхностей зубьев; г — заедание зубьев [9].

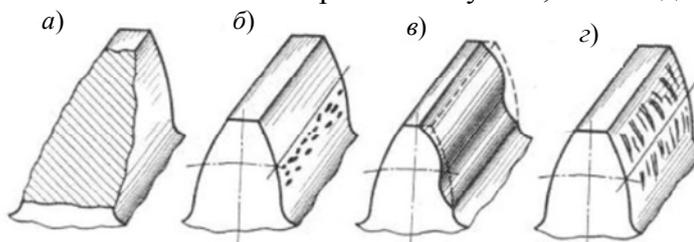


Рис. 4

Поломку и заедание зубьев можно отнести к внезапным аварийным отказам из-за достижения предельно допустимых усталостных напряжений или износов зубьев по технологическим или эксплуатационным причинам.

Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев можно моделировать путем испытания пар трения (типа рис. 1, б) при нулевом скольжении. Возникновение повреждений такого рода характерно для передач закрытого типа без попадания в смазку абразивных частиц. Такое исследование не относится к тематике настоящей статьи, хотя оно может быть использовано для оценки времени (ресурса) достижения предельно допустимого размера каверн и решения других научных проблем при неподвижном диске 2.

Испытания пар трения типа рис. 1, в при неподвижном диске 2 и $k_k=1$ являются рекомендуемым методом исследования процесса изнашивания материала поверхности зубьев открытых передач с целью оценки и повышения их износостойкости за счет выбора оптимальной твердости, смазки и пр. Для имитации абразивного износа рекомендуется на диск 1 наклеить мелкозернистую абразивную шкурку и проводить испытания при неподвижном диске 2 и различных уровнях твердости. Методика расчета износостойкости пары трения типа рис. 1, в описана выше.

В случае применения пары трения типа рис. 1, г при $0 < k_k < 1$ на диске возникают признаки как изнашивания, так и усталостного разрушения поверхности. В этом случае целью исследования может быть оценка зависимости степени опасности этих повреждений от коэффициента проскальзывания, режима испытаний (нагрузки, частоты вращения, числа циклов), вида трения, свойств смазочного материала, условий работы и др.

Таким образом, описанная в настоящей работе методика может быть рекомендована для практического применения при испытаниях пар трения типа „ring-on-ring“ на трибометрах СМЦ-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов Б. П., Лысюк А. Я., Лукиенко Л. В. Лабораторные работы по курсу „Основы трения и изнашивания элементов трибомеханических систем оборудования“. Новомосковск: РХТУ им. Д. И. Менделеева. Новомосковский институт, 2000. 26 с.
2. ASTM G77-05(2010). Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. DOI: 10.1520/G0077-05R10.
3. Shi-Quan Lai, Li Yueb, Tong-Sheng Li, Zhi-Meng Hu. The friction and wear properties of polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond // Wear. 2006. Vol. 260, N 4/5. P. 462—468.
4. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Алгоритмы оценки линейной, объемной (весовой) интенсивности изнашивания материалов на машине трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 291—299.

5. Davydov R. V., Tikalov A. V., Chulkin S. G., Breki1A. D., Efremov L. B., Rud V. Yu., Bykova N. N., Valiullin L. R. Development of a method for testing the wear resistance of friction pairs based on the synthesis of the method of M. V. Lomonosov with the improved method of artificial bases // *J. of Physics: Conf. Series*. 2021. P. 1—5. DOI:10.1088/1742-6596/1942/1/012058.
6. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Моделирование взаимосвязи твердости и износостойкости материалов при их сравнительном тестировании методом „block-on-ring“ // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21, № 2. С. 297—302. DOI: 10.17586/2226-1494-2021 -21 -2-297-302.
7. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.
8. Testo 476 — Стробоскопический тахометр [Электронный ресурс]: <<http://pp66.ru/katalog/pribory/tahometry/testo-476---stroboskopicheskiy-tahometr-portativnyy-elektronn/>>.
9. Виды разрушения зубьев [Электронный ресурс]: <<https://helpiks.org/5-92478.html>>.

Сведения об авторе

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, кафедра трения и износа; главный научный сотрудник;
E-mail: levlefr@mail.ru
- Андрей Владимирович Тикалов** — преподаватель-исследователь; АО „Компрессор“; начальник сектора;
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.21; одобрена после рецензирования 15.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Safonov B.P., Lysyuk A.Ya., Lukienko L.V. *Laboratorynye raboty po kursu "Osnovy treniya i iznashivaniya elementov tribomekhanicheskikh sistem oborudovaniya"* (Laboratory Work on the Course "Fundamentals of Friction and Wear of Elements of Tribomechanical Equipment Systems"), Novomoskovsk, 2000, 26 p. (in Russ.)
2. *ASTM G77-05(2010), Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. DOI: 10.1520/G0077-05R10.
3. Shi-Quan Lai, Li Yueb, Tong-Sheng Li, Zhi-Meng Hu. *Wear*, 2006, no. 4/5(260), pp. 462–468.
4. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 4(63), pp. 291–299. (in Russ.)
5. Davydov R.V., Tikalov A.V., Chulkin S.G., Breki1A.D., Efremov L.B., Rud V.Yu., Bykova N.N., Valiullin L.R. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, pp. 1–5, DOI:10.1088/1742-6596/1942/1/012058.
6. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, no. 2(21), pp. 297–302. DOI: 10.17586/2226-1494-2021 -21 -2-297-302 (in Russ.)
7. Efremov L.V. *Problemy upravleniya nadezhnostno-oriyentirovannoy tekhnicheskoy ekspluatatsiyey mashin* (Problems of Managing Reliability-Oriented Technical Operation of Machines), St. Petersburg, 2015, 206 p. (in Russ.)
8. <http://pp66.ru/katalog/pribory/tahometry/testo-476---stroboskopicheskiy-tahometr-portativnyy-elektronn/>. (in Russ.)
9. <https://helpiks.org/5-92478.html>. (in Russ.)

Data on author

- Leonid V. Efremov** — Dr. Sci, Professor; Institute of Mechanical Engineering Problems of the RAS, Department of Friction and Wear; Chief Researcher; E-mail: levlefr@mail.ru
- Andrey V. Tikalov** — Lecturer-Researcher of JSC "Compressor"; Head of the Sector;
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Received 05.12.21; approved after reviewing 15.12.21; accepted for publication 28.02.22.

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА
ПРИ ПОМОЩИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ**

В. Л. ТКАЛИЧ¹, М. Е. КАЛИНКИНА^{1*}, А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ^{1,2},
О. И. ПИРОЖНИКОВА¹, **С. В. БИБИКОВ¹**

¹Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*mariia_kalinkina@mail.ru

²Санкт-Петербургский филиал
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены особенности методов оценивания технического состояния при вибродиагностике электрооборудования. Проанализированы средства измерения вибрационных процессов, рассмотрены спектры амплитуд вибрации транспортных двигателей. Анализ показал, что при поиске предельных значений модуля характеристической функции для мгновенных значений виброакустических сигналов, которые соответствуют разным состояниям контролируемого объекта, требуется применение статистических методов, в частности метода минимальных рисков. Это позволяет находить пороговые значения признаков диагностирования на базе оценки рисков принятия решения. В ходе анализа виброакустического сигнала использована характеристическая функция мгновенных значений. Исследована плотность вероятностей значений модуля этой функции наиболее точным методом минимального числа ошибочных решений.

Ключевые слова: оценка технического состояния, характеристическая функция, виброакустический сигнал, неразрушающий контроль, метод Неймана—Пирсона

Благодарности: работа выполнена при поддержке фонда конкурса гранта Президента для государственной поддержки молодых российских ученых кандидатов наук. Регистрационный номер МК 5323.2022.4.

Ссылка для цитирования: Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И., Бибиков С. В. Методы оценки технического состояния транспортного средства при помощи вибродиагностики // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 287—294. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-287-294.

METHODS FOR ASSESSING A VEHICLE TECHNICAL CONDITION USING VIBRATION DIAGNOSTICS

V. L. Tklich¹, M. E. Kalinkina^{1*}, A. G. Korobeynikov^{1,2}, O. I. Pirozhnikova¹, **S. V. Bibikov¹**

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia
*mariia_kalinkina@mail.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia

Abstract. The advantages and disadvantages of existing methods for assessing the technical condition of vibration diagnostics of electrical equipment are considered. Available means of measuring vibration processes are reviewed, and the spectra of vibration amplitudes of transport engines are examined. The analysis shows that when searching for the limiting values of the characteristic function modulus for the instantaneous values of vibroacoustic signals that correspond to different states of the controlled object, the use of statistical methods, in particular the method of minimal risks, is required. This allows to find the threshold values of the signs of diagnosis based on the assessment of the risks of making a decision. In the course of the analysis of the vibro-acoustic signal, the characteristic function of instantaneous values is used. The probability density of the values of the function modulus is studied by the most accurate method of the minimum number of erroneous decisions.

Keywords: technical condition assessment, characteristic function, vibroacoustic signal, non-destructive testing, Neumann-Pearson method

Acknowledgments: This work was supported by the Presidential Grant Competition Fund for State Support of Young Russian Scientists Candidates of Science. Registration number MK 5323.2022.4.

For citation: Tkalich V. L., Kalinkina M. E., A. G. Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I., Bibikov S. V. Methods for assessing a vehicle technical condition using vibration diagnostics. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 287—294 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-287-294.

Введение. Определение критериев неисправности транспортного средства через параметры виброакустического сигнала относится к актуальной задаче технического диагностирования. Развитие средств диагностики и неразрушающего контроля является важнейшим фактором повышения экономической эффективности при использовании электрооборудования. Совершенствование технического диагностирования необходимо для своевременного выявления неисправностей, ведущих к отказам, прогнозирования дальнейшего нормального работоспособного состояния — с целью полного использования ресурса транспортного средства.

Не все методы неразрушающего контроля [1—14] обладают свойством универсальности. Особое место в техническом диагностировании занимает виброакустический метод. Метод вибродиагностики прекрасно зарекомендовал себя при оценке технического состояния электрооборудования на транспортных средствах благодаря быстрому отклику вибропроцессов на изменение состояния объекта и возможности выявления скрытых дефектов [15] еще на стадии их возникновения. В основе метода вибродиагностики лежит анализ данных о вибрации: проанализировав амплитуду гармоник различной частоты, получают информацию о состоянии объекта.

Основные уравнения. Вибродиагностирование электродвигателя [16] необходимо для выявления дефектов, повышения ресурса и надежности работы транспортного средства. От метода [1—14] диагностирования во многом зависит и полученный результат. Для оценки технического состояния роторов на практике в основном применяют методы: ПИК-фактора; спектра огибающей; ударных импульсов; прямого спектра.

Метод ПИК-фактора позволяет определять зарождающиеся дефекты [15], он прост в реализации. К недостаткам метода можно отнести низкую помехозащищенность и неопределенности при выявлении дефектов из-за наличия в сигнале белого шума [17].

Метод спектральной огибающей используется при анализе замедленного изменения мощности на фоне быстропротекающих процессов. К достоинству метода можно отнести высокую чувствительность, а к недостаткам — большую трудоемкость и стоимость анализатора спектра вибраций при достоверности результатов примерно 60 %.

Метод ударных импульсов основан на изменении параметров механических волн, возникающих при ударе двух тел. К достоинствам метода можно отнести его простоту и рентабельность, однако метод дает большую погрешность при определении конкретных дефектов и обладает низкой помехозащищенностью.

Метод прямого спектра основан на анализе спектра вибрации. Он обладает высокой помехозащищенностью, информативностью, а также позволяет прогнозировать остаточный ресурс для каждого дефекта. К недостаткам метода можно отнести высокие требования по правильному выбору информационных частот для установки датчиков. Этот метод наиболее пригоден для использования в экспертных системах вибродиагностирования [18].

На качество оценки технического состояния транспортного средства влияет и выбор средств диагностирования. В настоящее время существует возможность получения информации одновременно от целого ряда датчиков и оперативного произведения обработки результатов [19—22] в реальном масштабе времени.

Анализируя спектры амплитуд [23], которые получаются при обработке вибрационных процессов двигателя [16], можно выявлять дефекты [24, 25].

Поэтому грамотному выбору средства измерения необходимо уделять повышенное внимание при вибродиагностировании.

Необходимо также обратить внимание на корректный выбор математических моделей [26, 27] при определении информативных частот. Поэтому специалист по вибродиагностике должен грамотно выбрать метод, средства и математический аппарат для получения качественного результата оценивания технического состояния объекта.

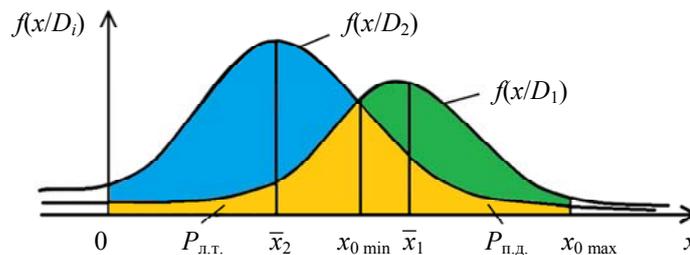
Разрабатывать систему [28] определяющих критериев возможных неисправностей необходимо на базе полученных совокупностей параметров виброакустических сигналов. Это позволяет достоверно определять техническое состояние электродвигателя. Обеспечение надежности и однозначности такого диагностирования является актуальной задачей неразрушающего контроля и диагностики объектов.

Для решения этой задачи необходимо развивать методологию принятия статистических решений и способов оценки рисков нормативных параметров так называемой характеристической функции. Оценивание модуля этой характеристической функции для заданного параметра позволяет принять решение об исправности объекта исследования или прекращении его эксплуатации вследствие выявленной неисправности при диагностике. Так, при $x < x_0$ объект признается неисправным, при $x > x_0$ — исправным:

$$\begin{cases} x \in D_1, & \text{при } x > x_0, \\ x \in D_2, & \text{при } x < x_0, \end{cases}$$

где D_1 — объект исправен, D_2 — объект неисправен.

На рисунке представлено распределение плотности вероятностей $f(x/D_i)$ от параметра x . Области $P_{л.т.}$ и $P_{п.д.}$ соответствуют вероятности ложной тревоги и пропущенного дефекта.



Состояние „ложная тревога“ относится к ошибке первого рода. При этом исправный объект может квалифицироваться как неисправный и D_1 засчитывается за D_2 . Состояние пропуска дефекта или не выявленного отказа относится к ошибке второго рода. При этом объект с неисправностью классифицируются как исправный и D_2 засчитывается как D_1 .

Вероятность ложной тревоги определяется как:

$$P(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(x < x_0/D_1) = P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1) dx = P_1 \cdot [1 - F(x_0/D_1)], \quad (1)$$

где H_{21} — ошибка второго рода; F — функция распределения.

Вероятность пропуска дефекта представляется выражением:

$$P(H_{12}) = P(D_2) \cdot P(x > x_0/D_2) = P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2) dx = P_2 \cdot F(x_0/D_2), \quad (2)$$

где H_{12} — ошибка первого рода.

Таким образом, вероятность выработки ошибочного решения напрямую зависит от вероятностей ложной тревоги и пропуска дефекта. Назначив численные значения (цену риска C_{21} и C_{12}) истинным решениям в зависимости от их значимости, можно оценить риски:

$$R = C_{11}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1)dx + C_{21}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1)dx + C_{12}P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2)dx + C_{22}P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2)dx, \quad (3)$$

где C_{21} и C_{12} — риски ложной тревоги и пропущенного дефекта.

При этом выражение для среднего риска имеет вид:

$$R = C_{12}P(H_{12}) + C_{21}P(H_{21}) = C_{12}P_2 [F(x_0/D_2)] + C_{21}P_1 [1 - F(x_0/D_1)]. \quad (4)$$

С учетом того, что x является случайной величиной, (4) является математическим ожиданием риска.

При описании статистических характеристик диагностических признаков можно использовать распределение Вейбулла—Гнеденко, которое обладает достаточной универсальностью, при иных параметрах оно может иметь другой вид. Следовательно, представляется целесообразным опираться на аппроксимацию двухпараметрическим распределением с учетом четности функции:

$$F(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0, \\ 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x}{c} \right)^b \right\}; & x > 0, \end{cases} \quad (5)$$

а плотность вероятности представить в виде:

$$f(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 0, \\ \frac{b}{c} \left(\frac{x}{c} \right)^{b-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x}{c} \right)^b \right\}; & x > 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $c > 0$, $b > 0$ — параметры масштаба и формы; x — случайная величина.

Граничное значение x_0 находится из уравнения:

$$\frac{f(x_0/D_1)}{f(x_0/D_2)} = \frac{P_2 \cdot (C_{12} - C_{22})}{P_1 \cdot (C_{21} - C_{11})} = \lambda, \quad (7)$$

где λ — порог принятия решения. Тогда (7) с учетом (6) примет вид:

$$f(x_0/D_1) = \frac{b_1}{c_1} \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1} \right\}, \quad f(x_0/D_2) = \frac{b_2}{c_2} \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2} \right\}, \quad (8)$$

где x_0 — граничное значение. В итоге получаем выражение:

$$\frac{\frac{b_1}{c_1} \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_1} \right)^{b_1} \right\}}{\frac{b_2}{c_2} \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{c_2} \right)^{b_2} \right\}} = \frac{P_2 \cdot C_{12}}{P_1 \cdot C_{21}}. \quad (9)$$

Условия методов принятия решений для определенных граничных значений x_0 диагностического параметра:

1) для метода минимального числа ошибочных решений — стоимость пропуска ложной тревоги и пропуска дефектов $\lambda = \frac{[P_2]}{[P_1]}$;

2) для метода наибольшего правдоподобия считаем, что стоимость и вероятность ложной тревоги равны аналогичным параметрам пропуска дефектов ($\lambda = 1$);

3) для метода минимакса — величина риска минимизируется и является наименьшей среди максимальных значений, связанных с „неблагоприятной“ величиной вероятности P_1

$$\left(\lambda = \frac{[(C_{12} - C_{22})(1 - P_1)]}{[(C_{21} - C_{11})P_1]} \right);$$

4) для метода Неймана—Пирсона считаем, что минимизируется вероятность P_1 пропуска дефектов для заданного допустимого уровня A , называемого вероятностью ложной тревоги

$$P_1 \int_{x_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right) dx \leq A.$$

В ходе обработки результатов расчетов граничного значения, полученных вышеперечисленными методами, установлено, что наименьшие риск принятия решения R и вероятность пропуска дефекта дает метод минимального числа ошибочных решений. Вторым результатом показал метод Неймана—Пирсона, а на последнем месте стоит метод минимакса.

Заключение. Анализ показал, что при поиске предельных значений модуля характеристической функции для мгновенных значений виброакустических сигналов, которые соответствуют разным состояниям контролируемого объекта, требуется применение статистических методов. Это позволяет находить пороговые значения признаков диагностирования на базе оценки рисков принятия решения. Целесообразно для диагностики использовать методы расчета параметров характеристических функций. В ходе анализа виброакустического сигнала использована характеристическая функция мгновенных значений. Исследована плотность вероятностей значений модуля этой функции наиболее точным методом минимального числа ошибочных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капустин В. В., Ушаков А. Л., Бакайкин Д. В. Применение акустических методов для обследования строительных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 25—28.
2. Капустин В. В. Акустические методы контроля качества свайных фундаментных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 12—16.
3. Бауков А. Ю. Разработка основ дифференциального виброакустического метода контроля многослойных конструкций // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. № 6. С. 126—132.
4. Павлов С. В. Применение вейвлет-анализа при обработке данных виброакустического метода контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. № 8. С. 118—123.
5. Баранов А. В. Диагностика состояния трущихся поверхностей методом ультразвуковой акустической эмиссии // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2014. № 2. С. 55—56.
6. Блинов А. В., Максимов П. В., Шиверский А. В., Горохов А. Ю. Определение дефектов и повреждений трубопровода путем анализа волновых процессов методом дискретного преобразования Фурье // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-3 [Электронный ресурс]: <<http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23345>>.
7. Алёшин Н. П., Ревель-Муроз П. А., Григорьев М. В., Прилуцкий М. А. Новые методы ультразвукового контроля внутритрубной диагностики магистральных нефтепроводов // Сварка и диагностика. 2016. № 1. С. 9—13.
8. Иляхинский А. В., Родюшкин В. М. Распределение Дирихле в задаче оценки состояния металла методом акустического зондирования // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 13—16.
9. Борейко Д. А., Быков И. Ю., Смирнов А. Л. Чувствительность метода акустической эмиссии при обнаружении дефектов в трубных изделиях // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 24—33.

10. Матвиенко А. Ф., Корзунин Г. С., Лоскутов В. Е., Бабкин С. А. Опыт контроля состояния труб магистральных газопроводов электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 28—37.
11. Бардаков В. В., Барат В. А., Терентьев Д. А., Чернов Д. В., Осипов К. О. Особенности применения метода акустической эмиссии при мониторинге мостовых конструкций // Контроль. Диагностика. 2016. № 1. С. 32—39.
12. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Лунев А. Г. О возможности оценки прочности металлов и сплавов неразрушающим ультразвуковым методом // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43, № 1. С. 202—204.
13. Бауков А. Ю., Павлов С. В. Компьютерное моделирование процессов изгибных колебаний упругих пластин применительно к оптимизации виброакустического метода неразрушающего контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2005. № 5. С. 77—83.
14. Лабковская Р. Я., Козлов А. С., Пирожникова О. И., Коробейников А. Г. Моделирование динамики чувствительных элементов герконов систем управления // Кибернетика и программирование. 2014. № 5. С. 70.
15. Хатьков Д. Н., Хатьков Н. Д. Поиск трещинообразных дефектов в массивных телах сложной конфигурации на основе использования метода локальных свободных колебаний // Научная сессия ТУСУР-2008: Матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 5—8 мая 2008. 2008. Ч. 1. С. 174—176.
16. Тобоев В. А., Толстов М. С. Устройство для акустической диагностики состояний автомобильных двигателей // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2012): Матер. 8-й Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары, 2012. С. 185—186.
17. Базулин Е. Г. Уменьшение уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решеток // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 3—19.
18. Рудин А. В., Рудин В. А. Экспериментальная диагностика деталей машин по спектральным характеристикам сигналов акустической эмиссии // Наука и образование транспорту: Матер. 3-й Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 130-летию транспортного образования в Пензенской области (Пензенского техникума железнодорожного транспорта). Самара—Пенза, 11—12 ноября 2010. 2010. С. 204—206.
19. Черникова Т. М., Иванов В. В. Принципы построения автоматизированной системы контроля разрушения материалов // 10-я Междунар. науч.-практ. конф. „Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах“. Кемерово, 28—29 ноября 2013. С. 104—106.
20. Овчарук В. Н., Пурицев Ю. А., Цинь Хуну. Информационно-измерительная система регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. Хабаровск, 25—27 июня 2013. 2013. С. 261—265.
21. Верлань А. Ф., Сагатов М. В., Ирмухамедова Р. М., Кадыров М. М. Цифровые системы измерения и обработки сигналов акустической эмиссии // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-25): Сб. тр. 25-й Междунар. науч. конф. Саратов, 29—31 мая 2012. 2012. Т. 6. С. 36—38.
22. Коробейников А. Г., Гришенцев А. Ю., Святкина М. Н. Применение интеллектуальных агентов магнитных измерений для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Кибернетика и программирование. 2013. № 3. С. 9—20.
23. Овчарук В. Н., Лях А. П. Программный комплекс анализа спектральных характеристик акустической эмиссии // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. Хабаровск, 25—27 июня 2013. 2013. С. 255—260.
24. Ивакин С. В., Байтураев А. В., Сивак Г. А. Установка для проведения акустических исследований // Всерос. науч. конф. „Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем“ (Системотехника-2011). Таганрог, 1 ноября 2011. С. 41—46.
25. Korobeynikov A. G., Grishentsev A. Y., Velichko E. N., Aleksanin S. A., Fedosovskii M. E., Bondarenko I. B., Korikov C. C. Calculation of Regularization Parameter in the Problem of Blur Removal in Digital Image // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2016. Vol. 25, N 3. P. 184—191.
26. Черкасский Е. П., Порсева Н. Ю. Стендовые виброакустические испытания кузовных деталей и силовых агрегатов автомобилей // Математическое моделирование и краевые задачи. Тр. 5-й Всерос. науч. конф. с международным участием. Самара, 29—31 мая 2008. Ч. 4. С. 135—139.

27. Тананаев Д. Д., Шагрова Г. В. Математическая модель определения состояния технического объекта на основе анализа акустического сигнала // Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании (Инфоком-6): Сб. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Ставрополь, 21—27 апреля 2014. Ч. 2. С. 246—255.
28. Модин А. Ю. Автоматизированная система обработки акустических сигналов при диагностике сварных соединений // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: Тр. 9 Всерос. Межвуз. науч.-практ. конф. Самара, 18 ноября 2010. С. 128—130.

Сведения об авторах

- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru
- Мария Евгеньевна Калининна** — магистрант; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова; зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: cheesecake@mail.ru
- Сергей Викторович Бибииков** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий;

Поступила в редакцию 08.12.21; одобрена после рецензирования 22.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Kapustin V.V., Ushakov A.L., Bakaykin D.V. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 1, pp. 25–28. (in Russ.)
2. Kapustin V.V. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 12, pp. 12–16. (in Russ.)
3. Baukov A.Yu. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2007, no. 6, pp. 126–132. (in Russ.)
4. Pavlov S.V. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2007, no. 8, pp. 118–123. (in Russ.)
5. Baranov A.V. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye v mashinostroyenii*, 2014, no. 2, pp. 55–56. (in Russ.)
6. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23345>. (in Russ.)
7. Aloshin N.P., Revel'-Muroz P.A., Grigor'yev M.V., Prilutskiy M.A. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 1, pp. 9–13. (in Russ.)
8. Ilyakhinskii A.V., Rodyushkin V.M. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 7, pp. 396–399.
9. Boreiko D.A., Bykov I.Y., Smirnov A.L. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 8, pp. 476–485.
10. Matvienko A.F., Loskutov V.E., Babkin S.A., Korzunin G.S. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 9, pp. 546–553.
11. Bardakov V.V., Barat V.A., Terentyev D.A., Chernov D.V., Osipov K.O. *Testing. Diagnostics*, 2016, no. 1, pp. 32–39. (in Russ.)
12. Zuev L.B., Semukhin B.S., Lunev A.G. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2002, no. 1(43), pp. 168–170.
13. Baukov A.Yu., Pavlov S.V. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2005, no. 5, pp. 77–83. (in Russ.)
14. Labkovskaya R.Ya., Kozlov A.S., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G. *Kibernetika i programmirovaniye*, 2014, no. 5, pp. 70–77. (in Russ.)
15. Khat'kov D.N., Khat'kov N.D. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2008* (Scientific session TUSUR-2008), Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists, Tomsk, May 5–8, 2008, pt. 1, pp. 174–176. (in Russ.)
16. Toboev V.A., Tolstov M.S. *Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike (ITEE-2012)* (Information Technologies in Electrical Engineering and Electric Power Industry (ITEE-2012)), Proc. of the 8th All-Russian Scientific and Technical Conference Cheboksary, 2012, pp. 185–186. (in Russ.)
17. Bazulin E.G. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 9, pp. 525–539.
18. Rudin A.V., Rudin V.A. *Nauka i obrazovaniye transportu* (Science and Education in Transport), Materials of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 130th Anniversary of Transport Education in the Penza Region (Penza Technical School of Railway Transport), Samara–Penza, November 11–12, 2010, pp. 204–206. (in Russ.)

19. Chernikova T.M., Ivanov V.V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatii v promyshlennno razvitykh regionakh* (Life Safety of Enterprises in Industrialized Regions), Materials of the 10th International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, November 28–29, 2013, pp. 104–106. (in Russ.)
20. Ovcharuk V.N., Purisev Yu.A., Qin Hongwu, *Informatsionnyye tekhnologii i vysokoproizvoditel'nyye vychisleniya* (Information Technology and High Performance Computing), Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Khabarovsk, June 25–27, 2013, pp. 261–265. (in Russ.)
21. Verlan A.F., Sagatov M.V., Irmukhamedova R.M., Kadyrov M.M. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-25)* (Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT-25)), Proc. of the 25th International Scientific Conference, Saratov, May 29–31, 2012, vol. 6, pp. 36–38. (in Russ.)
22. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Yu., Svyatkina M.N. *Kibernetika i programmirovaniye*, 2013, no. 3, pp. 9–20. (in Russ.)
23. Ovcharuk V.N., Lyakh A.P. *Informatsionnyye tekhnologii i vysokoproizvoditel'nyye vychisleniya* (Information Technology and High Performance Computing), Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Khabarovsk, June 25–27, 2013, pp. 255–260. (in Russ.)
24. Ivakin S.V., Baituryakov A.V., Sivak G.A. *Teoreticheskiye i metodicheskiye problemy effektivnogo funktsionirovaniya radiotekhnicheskikh sistem (Sistemotekhnika-2011)* (Theoretical and Methodological Problems of the Effective Functioning of Radio Engineering Systems (System Engineering-2011)), Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Taganrog, November 1, 2011, pp. 41–46. (in Russ.)
25. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Y., Velichko E.N., Aleksanin S.A., Fedosovskii M.E., Bondarenko I.B., Korikov C.C. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2016, no. 3(25), pp. 184–191.
26. Cherkassky E.P., Porseva N.Yu. *Matematicheskoye modelirovaniye i krayevyye zadachi* (Mathematical Modeling and Boundary Value Problems), Proc. of the 5th All-Russian Scientific Conference with International Participation, Samara, May 29–31, 2008. Pt. 4, pp. 135–139. (in Russ.)
27. Tananaev D.D., Shagrova G.V. *Infokommunikatsionnyye tekhnologii v nauke, proizvodstve i obrazovanii (Infokom-6)* (Infocommunication Technologies in Science, Production and Education (Infocom-6)), Proc. of the 6th International Scientific and Technical Conference, Stavropol, April 21–27, 2014, Pt 2, pp. 246–255. (in Russ.)
28. Modin A.Yu. *Komp'yuternyye tekhnologii v nauke, praktike i obrazovanii* (Computer Technologies in Science, Practice and Education), Proc. of the 9th All-Russian Interuniversity Scientific and Practical Conference, Samara, November 18, 2010, pp. 128–130. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|--|
| Vera L. Tkalich | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru |
| Mariia E. Kalinkina | — Undergraduate Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru |
| Anatoly G. Korobeynikov | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; Deputy Director for Research; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru |
| Olga I. Pirozhnikova | — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: cheesecake@mail.ru |
| Sergey V. Bibikov | — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; |

Received 08.12.21; approved after reviewing 22.12.21; accepted for publication 28.02.22.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТИНЪЕКЦИОННОГО ЭПИДЕРМИСА
МОДИФИЦИРОВАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАЙКЕЛЬСОНА—ФИЗО**

А. В. АРЕФЬЕВ¹, В. В. КУРЛОВ², В. Б. КОЦКОВИЧ², Е. Е. МАЙОРОВ^{2*},
В. П. ПУШКИНА², С. В. УДАХИНА²

¹ Университет при Межпарламентской ассамблее ЕврАзЭС,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
majorov_ee@mail.ru

Аннотация. Модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо исследован *in vivo* кожный покров пациентов до и после косметологических процедур. Показана актуальность работы, так как получение достоверных данных о геометрических параметрах поверхности кожи, ее состоянии важно для каждого человека. В качестве объекта исследования *in vivo* выбран рельеф поверхности кожи вокруг глаз у пациентов в возрасте 38—45 лет. Приведены оптическая и функциональная схемы измерительной системы, а также даны технико-эксплуатационные характеристики. Получены экспериментальные результаты для 10 пациентов. Выявлено, что после применения ботулотоксина кожа становится более гладкой и эластичной, практически отсутствует вариация высоты рельефа.

Ключевые слова: интерферометр, эпидермис, оптическая схема, длина когерентности, ботулотоксин, инъекция

Ссылка для цитирования: Арефьев А. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Удахина С. В. Исследование постинъекционного эпидермиса модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 295—302. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-295-302.

**EXAMINATION OF THE POST-INJECTION EPIDERMIS WITH A MODIFIED
MICHELSON-FIZEAU INTERFEROMETER**

A. V. Arefiev¹, V. V. Kurlov², V. B. Kotskovich², E. E. Maiorov^{2*},
V. P. Pushkina², S. V. Udakhina²

¹ University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC,
St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
majorov_ee@mail.ru

Abstract. The skin of patients before and after cosmetic procedures is studied *in vivo* with a modified Michelson-Fizeau interferometer. The relevance of the work is shown, since obtaining reliable data on the geometric parameters of the skin surface, its condition is important for every person. The surface relief of the skin around the eyes in patients aged 38—45 years is chosen as the object of the *in vivo* study. Optical and functional diagrams of the measuring system are given, as well as technical and operational characteristics. Experimental results are obtained for 10 patients. It is revealed that after the application of botulinum toxin, the skin becomes smoother and more elastic, there is practically no variation in the height of the relief.

Keywords: interferometer, human skin, optical diagram, coherence length, botulinum toxin, injection

For citation: Arefiev A. V., Kurlov V. V., Kotskovich V. B., Maiorov E. E., Pushkina V. P., Udakhina S. V. Examination of the post-injection epidermis with a modified Michelson-Fizeau interferometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 295—302 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-295-302.

Введение. На сегодняшний день получение качественного эффекта является важнейшей задачей эстетической медицины [1, 2]. Исследование *in vivo* поверхности кожи опико-электронными методами и средствами актуально и перспективно для косметологии. Получение достоверных данных о геометрических параметрах поверхности кожи всегда интересовало дерматологов и косметологов [3, 4]. Существует большой спектр контактных и бесконтактных приборов и систем для измерения рельефа эпидермиса. Контактные приборы и системы позволяют измерять рельеф поверхности кожи с погрешностью до 0,1 мкм. Ограничение возможности их применения продиктовано низкой производительностью, требованием высокого уровня виброзащиты, а также быстрым выходом из строя зондирующего элемента [5, 6].

Бесконтактные системы, к которым относятся опико-электронные приборы и комплексы, исключают указанные недостатки. Работа этих приборов и систем основана на сборе и обработке световых сигналов, отраженных от исследуемой поверхности. Наиболее перспективными в этом классе приборов являются интерферометрические, в частности, модифицированные системы с источником излучения, ограниченным временной когерентностью [7, 8]. Это новое в оптике направление активно развивается в последние годы.

Врачи-косметологи с помощью химических препаратов (ботулотоксина) разглаживают морщины, восстанавливая поверхность кожи и обеспечивая максимальный эстетический эффект [9, 10]. Инъекционное введение ботулотоксина через определенное время (несколько суток) устраняет выраженность морщин и улучшает тонус и текстуру кожи. В эстетической косметологии используется комплексная коррекция инволюционного изменения кожи для каждого пациента в отдельности. Индивидуальный подход позволяет подобрать оптимальные пути решения проблем [11, 12].

Поэтому целью работы явилось исследование *in vivo* модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо эпидермиса пациентов до и после косметологических процедур.

Метод и объекты исследования. В работе исследовался рельеф поверхности кожи вокруг глаз у пациентов в возрасте 38—45 лет до и после косметологических процедур. Все пациенты имели белый оттенок кожи и проживали в Санкт-Петербурге.

При косметологических процедурах пациентам вводился ботулотоксин [13, 14]. Измерения поверхности кожи были проведены модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо через семь суток после процедуры.

Исследование микрорельефа биологических объектов без применения инъекций и с их применением проводилось разработанным модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо, оптическая схема которого представлена на рис. 1 (*a* — блок, состоящий из интерферометра Майкельсона: *S* — источник излучения, *1, 5, 7* — объективы, *2* — светоделитель, *3* — контролируемая поверхность, *4* — опорное зеркало, *6* — диафрагма, *8* — камера, *G1* — стеклянная пластина, *P₀—P₁* — изменение рельефа; *b* — интерферометр Физо: *P* — поверхность биологического объекта).

В качестве источника излучения использовался диод белого света с длиной когерентности $l_c \approx 2\text{—}3$ мкм. Система построена на основе интерферометра Майкельсона, в котором одно из зеркал заменено стеклянной пластинкой и контролируемым объектом. Изображения плоскостей опорного зеркала *R* и объекта *G1* проецируются в цифровую камеру. Камера сфокусирована на плоскость *G1*. Плоскости *R* и *G1* находятся на одинаковом расстоянии от источника *S*.

Поскольку интерференционное поле имеет вид картины спеклов, фаза которых меняется случайным образом, расчет фазовых характеристик теряет смысл. Поэтому вместо изменения фазы регистрируется лишь факт появления интерференционной картины [15, 16]. Вследствие малой длины когерентности интерференция проявляется только для тех элементов поверхности объекта, которые близки к плоскости *G1*. Эта область изображения детектируется и запоминается в процессе перемещения объекта вдоль оси *Z*.

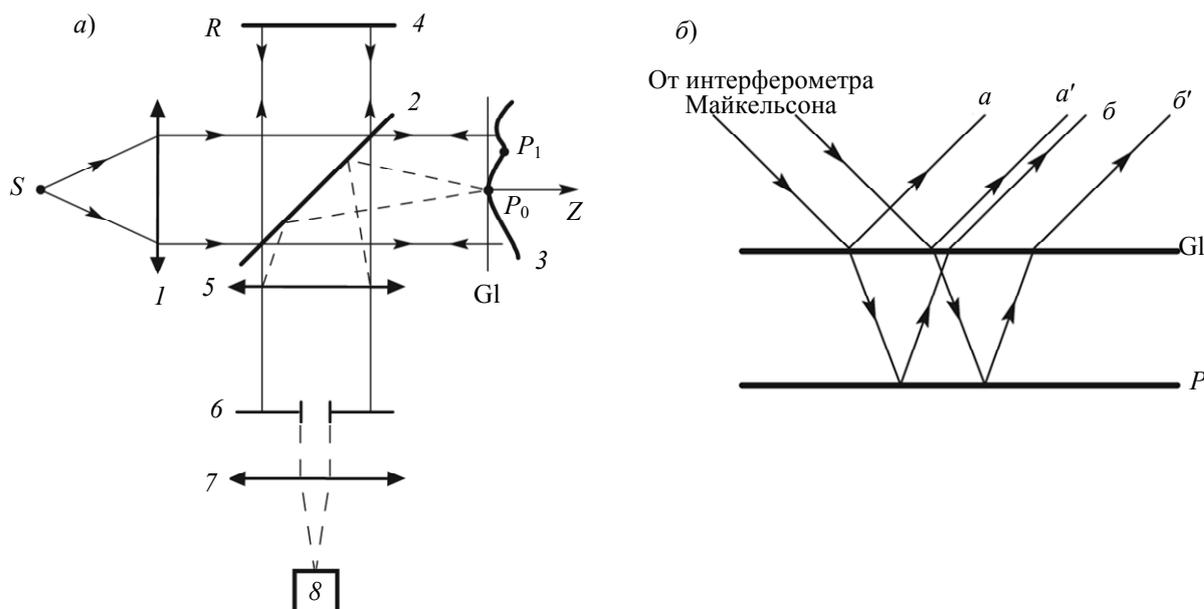


Рис. 1

Итак, в работе рассмотрена возможность использования разработанного интерферометра для контроля качества поверхности. Используется методика измерения толщины воздушного зазора между контролируемой биологической поверхностью и поверхностью стеклянной пластинки по схеме интерферометра Физо [17, 18].

Разработанный интерферометр исключает флуктуацию показателя преломления и неконтролируемые смещения относительно измеряемой поверхности. Часть излучения из двух каналов интерферометра Майкельсона направляется в виде двух потоков излучения с определенной оптической разностью хода к измеряемому воздушному зазору, образующему интерферометр Физо. В результате смещения в интерферометре Майкельсона появляется максимум контраста результирующих интерференционных полос, что соответствует толщине контролируемого зазора. Световые потоки из двух каналов интерферометра Майкельсона объединяются на светоделителе и направляются к измеряемому воздушному зазору — интерферометру Физо. Отраженные от передней и задней поверхностей воздушного зазора лучи могут интерферировать лишь в малой области разностей оптических путей, определяемой длиной когерентности источника излучения. Поэтому максимальный контраст интерференционного поля, регистрируемый цифровой камерой, будет достигнут при равенстве длин оптических путей двух отраженных световых волн.

При отражении двух лучей от границ воздушного промежутка (рис. 1, б) образуются лучи света a , a' , b , b' , отраженные от измеряемой поверхности и от опорной поверхности стеклянной пластины. Интерферируя попарно между собой, они образуют сложную интерференционную картину. Как только оси световых лучей a' и b совпадут, оптическая разность их хода станет равной нулю и будет сформирован интерференционный сигнал при ограниченной когерентности освещения.

Измерительная система состоит из двух блоков, один из которых является интерферометром Майкельсона, а второй — интерферометром Физо. В системе нулевая разность хода регистрируется по критерию максимума корреляции интерференционных сигналов. В процессе обработки сигналов используется метод вычитания фоновой составляющей на основе модифицированного метода управляемого фазового сдвига.

Технико-эксплуатационные характеристики измерительной системы:

- погрешность измерений $\sigma_z = 0,03—0,1l_c$ для $\theta = 0—30^\circ$;
- диапазон измерений рельефа поверхности 0—4 мм;
- частота измерений 46 точек в секунду;

- расстояние от оптического зрачка до поверхности 120 мм;
- габаритные размеры 250×250×180 мм.

Экспериментальные результаты. Функциональная схема исследования *in vivo* микро-рельефа поверхности кожи представлена на рис. 2 (1, 11 — диоды белого света, 2 — микро-объектив, 3 — светоделитель, 4 — объект; 5, 7, 8 — зеркала; 6, 12 — фотоприемные устройства, 9 — модулятор, 10 — дифракционные решетки, 13 — датчик скорости, 14 — блок электронной обработки сигналов, 15 — плоскопараллельная пластина, РС — компьютер, M_1-O_1 — длина опорного плеча).

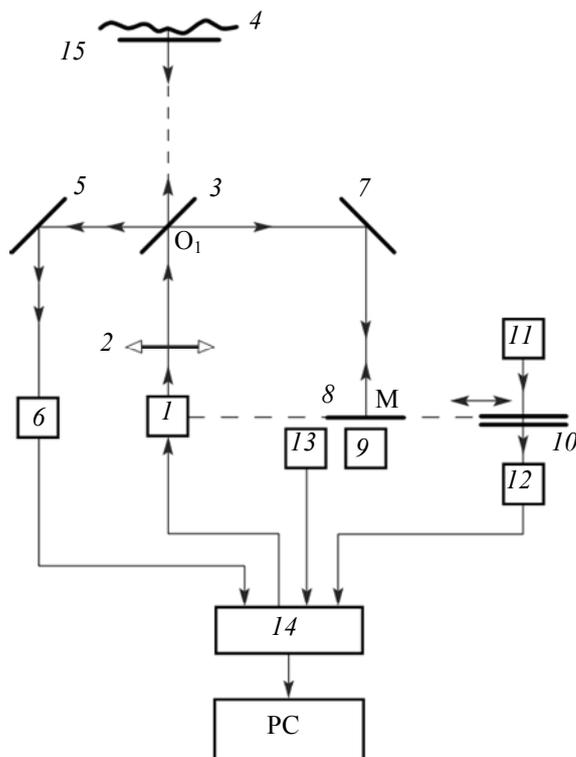
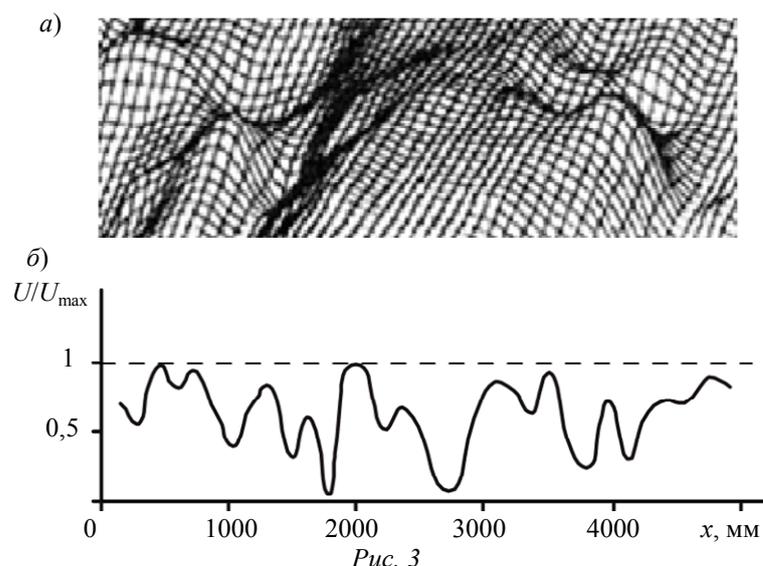


Рис. 2

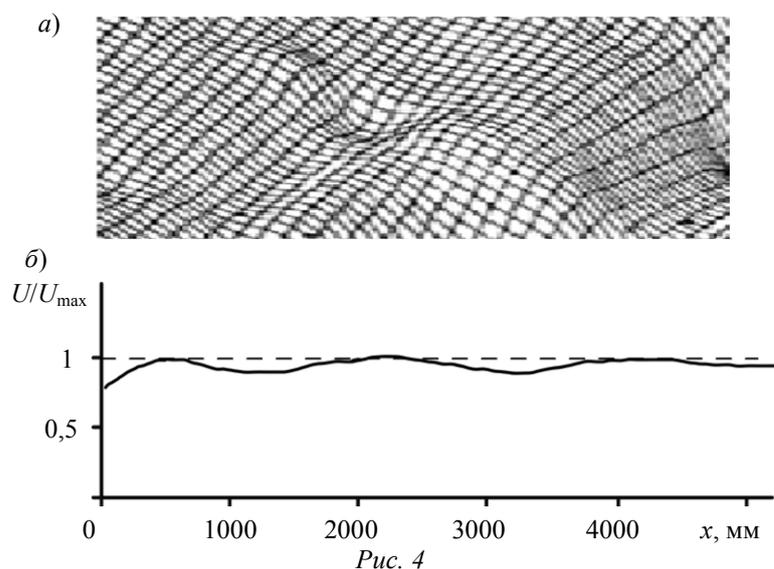
При динамических исследованиях, к которым относятся измерения *in vivo*, необходимо обеспечить независимость результатов от возможных смещений контролируемой поверхности за время сканирования. Проще всего это осуществить, если в качестве базовой плоскости отсчета использовать плоскопараллельную пластину, которая жестко прикреплена к контролируемой поверхности. В этом случае измеряемой величиной является зазор между двумя указанными поверхностями.

В эксперименте площадь анализируемого участка поверхности кожи равна 4×8 мм. Измерения производились поточно с частотой 46 Гц. Для обеспечения съема информации с такого участка было изготовлено специальное устройство механического сканирования измерительной головки: линейно — по одной координате, по синусоидальному закону — по другой. Для графической визуализации результатов измерений была разработана программа Special Interferometer.

На рис. 3 приведены результаты экспериментального исследования *in vivo* рельефа до проведения косметологических процедур у 10 пациентов в возрасте 38—45 лет. На рис. 3, а представлен обработанный программой Special Interferometer фрагмент поверхности кожи вокруг глаз до инъекции. На рис. 3, б показано изменение амплитуды сигнала при перемещении зондирующего пятна по поверхности кожи до косметологических процедур.



На рис. 4, *a* показан фрагмент эпидермиса после введения ботулотоксина. На рис. 4, *б* приведена зависимость амплитуды сигнала при контроле места инъекции.



Проведя сравнительный анализ графических зависимостей, можно сделать следующий вывод: ботулотоксин изменяет геометрические параметры поверхности кожи. Кожа становится более гладкой, и вариация высоты рельефа не наблюдается, то есть морщины „расправляются“.

Заключение. Проведенные исследования представляют значимый интерес как для дерматологии, косметологии, так и для оптического приборостроения. Данные по микрорельефу поверхности биологического объекта могут быть полезны при разработке методов и средств для корректирования инволюционных проявлений старения кожи. Результаты работы целесообразно применять для сравнительного анализа *in vivo* при использовании других взаимодополняемых техник на эпидермисе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tordjman M.* Rajeunissement cutane du decollete par mesotherapie // *J. Med. Esth. Chir. Dermatol.* 2003. Vol. 118. P. 111—118.

2. *Vaumann L.* Cosmetic Dermatology: principles and practice. Medpress-inform, 2013. P. 288—325 [Электронный ресурс]: <<https://online.fliphtml5.com/xzqr/jtph/#p=1>>.
3. *Бакина Е. В.* Современные методы омоложения в эстетической косметологии // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 4(46). С. 74—76. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.225.
4. *Antoniou C., Kosmadaki M. G., Stratiges A. J., Katsambas A. D.* Photoaging: prevention and topical treatments // *Am. J. Clin. Dermatol.* 2010. Vol. 11. P. 95—102.
5. *Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Цыганкова Г. А., Машек А. Ч., Константинова А. А.* Разработка оптической системы обработки голографических интерферограмм // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 7. С. 25—32. DOI: 10.25791/pribor.07.2020.1190.
6. *Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Таюрская И. С.* Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2020. № 8. С. 179—189.
7. *Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Хохлова М. В.* Измерение микрорельефа негладких поверхностей автоматизированным интерферометром в низкокогерентном свете // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2020. № 8. С. 211—219.
8. *Цыганкова Г. А., Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А.* Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // Приборы. 2021. № 2. С. 20—25.
9. *Шарова А. А., Чайковская Е. А.* Распространение, диффузия, диссоциация ботулотоксинов: есть ли предмет для споров? // Инъекционные методы в косметологии. 2013. № 1. С. 46—54.
10. *Fournier N., Kerscher M., Ruiz-Avila J.* The convergence of medicine and neurotoxins: a focus on botulinum toxin type A and its application in aesthetic medicine—a global, evidence-based botulinum toxin consensus education initiative: part II: incorporating botulinum toxin into aesthetic clinical practice // *Dermatol. Surg.* 2013. Vol. 39, N 3. Pt. 2. P. 510—525.
11. *Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Константинова А. А., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Громов О. В.* Расчет основных параметров оптико-электронной системы наблюдения и изучения интерференционных структур на голограммах // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 2. С. 184—192.
12. *Майоров Е. Е., Громов О. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Петрова Е. А., Пушкина В. П., Таюрская И. С.* Исследование рельефа поверхности биологических объектов методом контроля, анализирующим расходимость // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 2. С. 383—388.
13. *Lin K. H., Chen S. P., Fuh J. L.* Efficacy, safety, and predictors of response to botulinum toxin type A in refractory chronic migraine: a retrospective study // *J. Chin. Med. Assoc.* 2014. Vol. 77, N 1. P. 10—15.
14. *Uyesugi B., Lippincott B., Dave S.* Treatment of apainful keloid with botulinum toxin type A // *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 2010. Vol. 89, N 2. P. 153—155.
15. *Громов О. В., Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Удахина С. В., Писарева Е. А., Константинова А. А.* Измерения оптических свойств кожного покрова *in vivo* под воздействием современных увлажняющих средств // Междунар. науч.-исслед. журн. 2021. № 3(105). С. 38—43. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.105.3.006>.
16. *Хохлова М. В., Арефьев А. В., Майоров Е. Е., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Громов О. В.* Экспериментальное исследование метрологических характеристик разработанного оптического щупа триггерного типа // Приборы. 2021. № 5. С. 8—16.
17. *Хохлова М. В., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В.* Исследование оптико-электронной системы при обработке голографических пластин // Междунар. науч.-исслед. журн. 2021. № 8(110). С. 103—108. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015>.
18. *Хохлова М. В., Пушкина В. П., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Гулиев Р. Б.* Исследование биологических объектов методом геометрической оптики // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 667—673. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-8-667-673.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Арефьев — канд физ.-мат. наук, доцент; Университет при Межпарламентской ассамблее ЕврАзЭС, кафедра математики и информационных технологий; E-mail: aaref@yandex.ru

- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Владимир Богданович Коцкович** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики; E-mail: kotskovich_vb@mail.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Вера Павловна Пушкина** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики; E-mail: vera150465@yandex.ru
- Светлана Вячеславовна Удахина** — канд. эконом. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: udahina@mail.ru

Поступила в редакцию 15.12.21; одобрена после рецензирования 23.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

- Tordjman M. *J. Med. Esth. Chir. Dermatol.*, 2003, vol. 118, pp. 111–118.
- Baumann L. *Medpress-inform.*, 2013, pp. 288–325, <https://online.fliphtml5.com/xzqr/jtph/#p=1>.
- Bakina E.V. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2016, no. 4(46), pp. 74–76, DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.225. (in Russ.)
- Antoniou C., Kosmadaki M.G., Stratiges A.J., Katsambas A.D. *Am. J. Clin. Dermatol.*, 2010, vol. 11, pp. 95–102.
- Majorov E.E., Chernyak T.A., Tsygankova G.A., Mashek A.Ch., Konstantinova A.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 7, pp. 25–32, DOI: 10.25791/pribor.07.2020.1190. (in Russ.)
- Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Majorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 8, pp. 179–189. (in Russ.)
- Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliev R.B., Dagaev A.V., Majorov E.E., Khokhlova M.V. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 8, pp. 211–219. (in Russ.)
- Tsygankova G.A., Majorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A. *Pribory*, 2021, no. 2, pp. 20–25. (in Russ.)
- Sharova A.A., Chaykovskaya E.A. *In"yektivnyye metody v kosmetologii*, 2013, no. 1, pp. 46–54. (in Russ.)
- Fournier N., Kerscher M., Ruiz-Avila J. *Dermatol. Surg.*, 2013, no. 3(39), pp. 510–525.
- Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Konstantinova A.A., Majorov E.E., Pisareva E.A., Gromov O.V. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 2, pp. 184–192. (in Russ.)
- Majorov E.E., Gromov O.V., Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Petrova E.A., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 2, pp. 383–388. (in Russ.)
- Lin K.H., Chen S.P., Fuh J.L. *J. Chin. Med. Assoc.*, 2014, no. 1(77), pp. 10–15.
- Uyesugi B., Lippincott B., Dave S. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, 2010, no. 2(89), pp. 153–155.
- Gromov O.V., Majorov E.E., Chernyak T.A., Udakhina S.V., Pisareva E.A., Konstantinova A.A. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 3(105), pp. 38–43, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.105.3.006>. (in Russ.)
- Khokhlova M.V., Arefiev A.V., Majorov E.E., Guliev R.B., Dagaev A.V., Gromov O.V. *Pribory*, 2021, no. 5, pp. 8–16. (in Russ.)
- Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Majorov E.E., Arefiev A.V., Guliev R.B., Gromov O.V. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 8(110), pp. 103–108, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015> (in Russ.)
- Khokhlova M.V., Pushkina V.P., Kotskovich V.B., Majorov E.E., Guliev R.B., Arefiev A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 8(64), pp. 667–673, DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-8-667-673. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander V. Arefiev** — PhD, Associate Professor; University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, Department of Mathematics and Information Technologies; E-mail: aaref@yandex.ru
- Viktor V. Kurlov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Vladimir B. Kotskovich** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail: kotskovich_vb@mail.ru

-
- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Vera P. Pushkina** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail: vera150465@yandex.ru
- Svetlana V. Udakhina** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: udakhina@mail.ru

Received 15.12.21; approved after reviewing 23.12.21; accepted for publication 28.02.22.