ISSN 2500—0381
Электронная версия

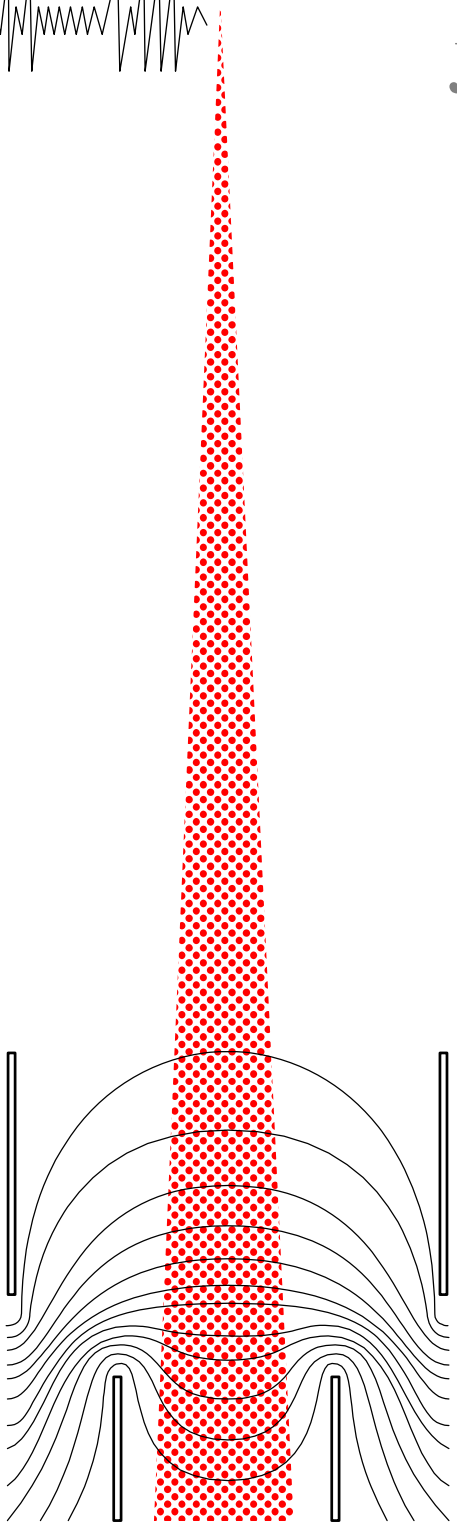
ISSN 0021—3454
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 6
Т. 65
2022



Journal of Instrument Engineering

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/

Подписано в печать 21.06.2022 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

© „Известия вузов. Приборостроение“, 2022

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/

Индекс 70374

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Адрес: 197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73
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.

ISSN 0021–3454. Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 379—456.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
ИЗДАНИЕ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО
Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 65 **ИЮНЬ 2022** **№ 6**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Стародубцев В. Г. Множества ГМВ-подобных последовательностей для систем передачи и обработки цифровой информации 383

Ожиганов А. А., Прибыткин П. А. Условие построения циклических кодов для композиционных кодовых шкал цифровых преобразователей угла 394

Павловский А. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Оценка разброса аэродинамических характеристик многофункционального приемника воздушного давления 398

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. Г. Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта 406

Майоров Е. Е. Измерение оптических параметров покрасочного слоя колориметрическим прибором 413

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Кутьин А. Ю., Мусалимов В. М., Малов М. С. Моделирование динамических процессов в системе управления плотностью композитной намотки 420

Мещеряков В. Д., Николаев П. Н., Хусаинов А. А. Определение ориентации платформы стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника 430

Строк Л. В., Коднянко В. А., Секацкий В. С. Влияние отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные характеристики 443

Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И. Расчет трещин в металлических конструкциях объектов транспортной инфраструктуры ... 451

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

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65 **JUNE 2022** **№ 6**

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

Starodubtsev V. G. Sets of GMW-like Sequences for Digital Information Transmission and Processing Systems 383

Ozhiganov A. A., Pribytkin P. A. Condition for Cyclic Codes Constructing for Composite Code Scales of Digital Angle Converters 394

Pavlovskiy A. A., Soldatkin V. V., Soldatkin V. M. Estimation of the Spread of Aerodynamic Characteristics in Multifunctional Air Pressure Receiver 398

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Zenevich A.O., Zhdanovich S. V., Novikov E. V., Matkovskaia T. A., Kovalenko T. G. Investigation of the Possibility of Combining a Fiber-Optic Communication Line and an Object Monitoring System 406

Maiorov E. E. Measuring the Paint Layer Optical Parameters with a Colorimetric Instrument 413

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Kutin A. Yu., Musalimov V. M., Malov M. S. Modeling of Dynamic Processes in the Composite Winding Density Control System 420

Meshcheryakov V. D., Nikolaev P. N., Khusainov A. A. Defining the Orientation of the Stand Platform for Semi-Natural Modeling of the Dynamics of a Nanosatellite Relative Motion 430

Strok L. V., Kodnyanko V. A., Sekatsky V. S. Influence of Size Deviations of Gas-Static Supports in Precision Measuring Equipment on Their Operational Characteristics 443

Tkalich V. L., Kalinkina M. E., Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I. Calculation of Cracks in Metal Structures of Transport Infrastructure Facilities 451

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 overstimate 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

УДК 519.725
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-383-393

МНОЖЕСТВА ГМВ-ПОДОБНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. Г. СТАРОДУБЦЕВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия,
vgstarod@mail.ru

Аннотация. Представлены два множества FF_{G1} и FF_{G2} последовательностей, подобных последовательностям Гордона—Миллса—Велча (ГМВ) в конечных полях GF(2^S) для значений S=2mod4. Множества ГМВ-подобных последовательностей (ГМВ ПП) характеризуются пятиуровневой периодической автокорреляционной и четырехуровневой взаимной корреляционными функциями. Максимальное значение модуля взаимной корреляционной функции $|R_{\max}| = (2^{S/2+1}-1)$ данных множеств меньше аналогичного значения для последовательностей Голда — $(2^{S/2+1}+1)$. Мощность множества ГМВ ПП FF_{G1} равна половине периода последовательностей $M_1 = (N+1)/2 = 2^{S/2}$. Все последовательности этого множества сбалансированы, т.е. их вес равен $V = 2^{S/2}$. Мощность множества ГМВ ПП FF_{G2} примерно равна периоду последовательностей $M_2 = (N+1) = 2^{S/2}$. Последовательности множества FF_{G2} являются несбалансированными, т.е. их вес может принимать четыре значения: $V = [2^{S/2-1}(2^{S/2}+1);\ 2^{S-1};\ 2^{S/2-1}(2^{S/2}-1);\ 2^{S/2}(2^{S/2-1}-1)]$. Показано, что формирование множеств ГМВ ПП с этими характеристиками мощности и корреляции возможно только для периодов $N = 63, 1023, 16\,383, 262\,143$, для которых существуют ГМВ-последовательности с проверочными полиномами степени 2^S.

Ключевые слова: *конечные поля, примитивные полиномы, М-последовательности, ГМВ-последовательности, корреляционная функция, структурная скрытность*

Ссылка для цитирования: *Стародубцев В. Г.* Множества ГМВ-подобных последовательностей для систем передачи и обработки цифровой информации // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 383—393. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-383-393.

SETS OF GMW-LIKE SEQUENCES FOR DIGITAL INFORMATION TRANSMISSION AND PROCESSING SYSTEMS

V. G. Starodubtsev

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vgstarod@mail.ru

Abstract. Two sets of sequences similar to Gordon-Mills-Welch (GMW) sequences in finite fields GF(2^S) for values S=2 mod 4 are presented. Sets of GMW-like sequences are characterized by a five-level periodic autocorrelation and a four-level cross-correlation function. For these sets, the maximum value of the modulus of the mutual correlation function $|R_{\max}| = (2^{S/2+1}-1)$ is less than the same value for Gold sequences equal to $(2^{S/2+1}+1)$. The power of one of the sets, FF_{G1}, is equal to half of the sequence period $M_1 = (N+1)/2 = 2^{S/2}$. All sequences of this set are balanced, that is, their weight is equal to $V = 2^{S/2}$. The power of the other set of GMW- like sequences, FF_{G2}, is approximately equal to the period of the sequences $M_2 = (N+1) = 2^{S/2}$. The sequences of FF_{G2} set are unbalanced, that is, their weight can take four values $V = [2^{S/2-1}(2^{S/2}+1);\ 2^{S-1};\ 2^{S/2-1}(2^{S/2}-1);\ 2^{S/2}\ (2^{S/2-1}-1)]$. It is shown that formation of sets of GMW-like sequences with these power and correlation characteristics is possible only for periods N = 63, 1023, 16383, 262143, for which there exist GMW sequences with verification polynomials of degree 2^S.

© *Стародубцев В. Г., 2022*

Keywords: finite fields, primitive polynomials, M-sequences, GMW-sequences, correlation function, structural secrecy

For citation: Starodubtsev V. G. Sets of GMW-like sequences for digital information transmission and processing systems. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 383—393 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-383-393.

Повысить помехозащищенность систем передачи цифровой информации (СПЦИ), в которых предусматривается корреляционная обработка фазоманипулированных сигналов с расширенным спектром (СРС), позволяет, в частности, применение псевдослучайных последовательностей (ПСП) с низким уровнем взаимной корреляции [1, 2]. При использовании в СПЦИ режима с кодовым многостанционным доступом для разделения каналов связи различных абонентов применяются фазоманипулированные сигналы на основе последовательностей Голда, Касами и др. [3—5].

Разработке методов и алгоритмов формирования ПСП и их множеств с низким уровнем взаимной корреляции посвящено большое количество научных работ [6—18]. В [6] рассмотрен метод построения бинарных последовательностей с асимптотически оптимальным ростом уровня боковых лепестков автокорреляционной и взаимной корреляционной функций из наборов последовательностей с хорошими корреляционными свойствами. В [7] представлен обобщенный циклотомический метод формирования новых семейств двоичных последовательностей, основанный на китайской теореме об остатках.

В последнее время внимание исследователей уделяется методам генерации совершенных целочисленных гауссовых последовательностей произвольной длины с нулевой автокорреляцией, которые находят применение в современных системах связи, таких как CDMA и OFDM [8—10]. Данные последовательности могут быть сформированы на основе следовых представлений последовательностей Лежандра, шестеричных последовательностей вычетов Холла, М-последовательностей (МП) и ГМВ-последовательностей над конечным полем $GF(2^S)$ [11]. При этом шестеричная последовательность вычетов Холла обладает признаками псевдослучайности, имеет идеальную двухуровневую автокорреляцию и линейную сложность порядка величины ее периода [12].

В работах [13—15] исследуются алгоритмы построения последовательностей с непосредственной минимизацией интегрального уровня боковых лепестков корреляционной функции на основе общей структуры алгоритмов максимизации-минимизации. В некоторых телекоммуникационных приложениях используются последовательности с апериодической корреляцией [16]. В [17] проанализировано формирование пар конечных комплекснозначных последовательностей, основанных на различных последовательностях Чу и имеющих низкий уровень апериодических автокорреляционной и взаимной корреляционной функций по критерию Сарвате—Персли.

В [18] предложен эффективный метод формирования аффинных подсемейств, входящих в семейство последовательностей, формируемых с помощью нелинейного регистра сдвига с обратной связью. Эти последовательности обладают высокой структурной скрытностью, характеризующейся эквивалентной линейной сложностью.

Впервые термин „ГМВ-подобная последовательность“ (ГМВ ПП) применен в статье [19]. Данные последовательности формируются на основе тех же проверочных полиномов, что и ГМВ-последовательности, но при этом характеризуются пятиуровневой периодической автокорреляционной функцией (ПАКФ) и использованием в качестве базисной последовательности не только канонической МП, но и МП с произвольным начальным состоянием.

Цель настоящей статьи — разработка процедур формирования множеств ГМВ-подобных последовательностей с низким уровнем взаимной корреляции в конечных полях $GF(2^S)$.

ГМВ ПП формируются на основе ГМВ-последовательностей в конечных полях $GF(2^S)$, для которых степень расширения является четным числом $S = 2m = 2\text{mod}4$ и которые могут быть представлены в виде полей с двойным расширением $GF[(2^m)^2]$. Проверочные полиномы формируемых последовательностей должны иметь степень $2S$ и являться произведением только двух неприводимых полиномов, один из которых примитивный.

С учетом этих ограничений множества ГМВ ПП могут быть получены для периодов $N = 2^6–1 = 63$, $N = 2^{10}–1 = 1023$, $N = 2^{14}–1 = 16\,383$, $N = 2^{18}–1 = 262\,143$.

Символы g_i ГМВ-последовательности F_G с периодом $N = 2^{2m}–1$, которые используются для формирования ГМВ ПП, определяются выражением [4, 20]:

$$g_i = \text{tr}_{m1}[(\text{tr}_{2m,m}(\alpha^i))^r], \; 1 \le r < p^m - 1, \; (r, p^m - 1) = 1, \tag{1}$$

где $\text{tr}_{a,b}(\cdot)$ — функция следа элемента поля $GF(2^a)$ в поле $GF(2^b)$; $\alpha \in GF(2^{2m})$ — примитивный элемент; r — натуральное число, взаимно простое с порядком мультипликативной группы поля $GF(2^m)$, равным $2^m - 1$.

Структурная скрытность ПСП определяется эквивалентной линейной сложностью (ЭЛС), которая для ГМВ-последовательностей имеет вид [4]:

$$l_s = m \cdot n^{\varphi(r)}, \tag{2}$$

где $\varphi(r)$ — количество единиц в двоичном представлении числа r в (1).

Разработку процедур проведем на примере формирования множеств ГМВ ПП с периодом $N = 63$ в конечном поле $GF(2^6)$ при $S = 2\text{mod}4$. Неприводимые полиномы шестой степени этого поля приведены в табл. 1 [21] (здесь и далее нижние индексы в обозначении полиномов соответствуют минимальным показателям степени их корней).

Таблица 1

Неприводимые полиномы в $GF(2^6)$

Полином	Корни полинома (показатели степеней)	Период корней
$h_1(x) = x^6 + x + 1$	$\alpha^1, \alpha^2, \alpha^4, \alpha^8, \alpha^{16}, \alpha^{32}$	63
$h_3(x) = x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$	$\alpha^3, \alpha^6, \alpha^{12}, \alpha^{24}, \alpha^{48}, \alpha^{33}$	21
$h_5(x) = x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$	$\alpha^5, \alpha^{10}, \alpha^{20}, \alpha^{40}, \alpha^{17}, \alpha^{34}$	63
$h_{11}(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$	11, 22, 44, 25, 50, 37	63
$h_{13}(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$	13, 26, 52, 41, 19, 38	63
$h_{15}(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$	15, 30, 60, 57, 51, 39	21
$h_{23}(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x + 1$	23, 46, 29, 58, 53, 43	63
$h_{31}(x) = x^6 + x^5 + 1$	31, 62, 61, 59, 55, 47	63

В рамках исследований будут рассмотрены процедуры формирования двух множеств ГМВ ПП: FF_{G1} и FF_{G2}.

Процедура формирования множества FF_{G1} основана на использовании канонической формы записи базисной МП $F_{\text{МП}}$ и различных циклических сдвигов сформированной на ее основе ГМВ-последовательности F_G.

В конечном поле $GF(2^S) = GF(2^6)$ с неприводимым полиномом $f(x) = x^6+x+1$ и примитивным элементом $\alpha = a$ символы c_i базисной МП $F_{\text{МП}}$ в канонической форме записываются с учетом (1) при $r = 1$ в виде

$$c_i = \text{tr}_{S1}\alpha^i = \text{tr}_{61}\alpha^i, \quad 0 \le i < 2^S–2 = 2^6–2 = 62. \tag{3}$$

Начальные и конечные символы c_i канонической формы записи МП $F_{\text{МП}}$ с проверочным полиномом $h_{\text{МП}}(x)=x^6+x+1$ в соответствии с (3) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Формирование ГМВ-последовательности F_G

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	…	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
c_i	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	…	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
c_{3i}	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	…	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
c_{5i}	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	…	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
g_i	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	…	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

На основании символов базисной МП вида (3) может быть сформирована ГМВ-последовательность F_G с проверочным полиномом $h_G(x)$, равным произведению двух неприводимых полиномов $h_{ci}(x)$, один из которых $h_5(x)$ является примитивным, а другой $h_3(x)$ — неприводимым, с корнями, имеющими период $N = 21$ [20, 21]:

$$h_G(x) = h_{c1}(x)h_{c2}(x) = h_3(x)h_5(x) = (x^6+x^4+x^2+x+1)(x^6+x^5+x^2+x+1). \quad (4)$$

Полиномы $h_{ci}(x)$ определены для случая $r = 3$ в (1). Так как $\varphi(r{=}3) = 2$, то ЭЛС ГМВ-последовательности, в соответствии с (2), равна $l_S = 12$.

ГМВ-последовательность F_G входит в множество FF_{G1}, а ее символы g_i, в соответствии с (4), могут быть получены путем суммирования по mod2 символов c_{3i} и c_{5i} двух последовательностей (см. табл. 2 — 3-я и 4-я строки), полученных путем децимации символов c_i базисной МП $F_{\text{МП}}$ по индексам децимации $i_{d1} = 3$ и $i_{d2} = 5$, соответствующих минимальным показателям степени корней полиномов $h_3(x)$ и $h_5(x)$:

$$g_i = c_{3i} \oplus c_{5i}, \quad 0 \le i < 2^S{-}2 = 62, \quad (5)$$

где вычисление индексов выполняется по mod63.

Множество ГМВ ПП FF_{G1} образуется из последовательностей $F_{G1,k}$, получаемых путем сложения по mod2 последовательности F_G и ее различных циклических сдвигов. С вычислительной точки зрения эта процедура соответствует определению ПАКФ полученной ГМВ-последовательности.

Для двоичных последовательностей ПАКФ определяется выражением [2, 4]:

$$R(\tau) = N{-}2D(\tau), \quad (6)$$

где $D(\tau)$ — расстояние по Хэммингу между циклическими сдвигами последовательностей для различных значений τ.

Для двоичных последовательностей расстояние $D(\tau)$ равно числу несовпадающих позиций в двух циклических сдвигах, что эквивалентно весу V последовательности, получаемой при суммировании по mod2 этих сдвигов.

Так как ПАКФ ГМВ-последовательности является четной функцией, то при первом способе формирования мощность множества ГМВП ПП FF_{G1} равна

$$M_1 = 2^{S-1} = (N{+}1)/2 = 32. \quad (7)$$

Множество FF_{G1} включает $(N{-}1)/2$ последовательность $F_{G1,k}$, получаемую при сложении двух циклических сдвигов ГМВ-последовательности F_G для $1 \le \tau \le 2^{S-1}{-}1 = 31$, и непосредственно исходную F_G. Вес каждой последовательности будет равен $V_1 = 2^{S-1} = 32$, так как ПАКФ ГМВ-последовательности является двухуровневой. При значениях сдвига $32 = 2^{S-1} \le \tau \le 2^S{-}2 = 62$ формируются циклические сдвиги уже рассмотренных последовательностей. В этом случае значения сдвигов τ определяются из условия равенства суммы значений $2^S{-}1 = 63$. Например, циклическими сдвигами являются последовательности при $\tau_1 = 5$ и $\tau_2 = 58$, а также при $\tau_1 = 17$ и $\tau_2 = 46$.

Определим периодическую взаимную корреляционную функцию (ПВКФ) некоторых пар последовательностей $F_{G1,k}$, как входящих в множество ГМВ ПП FF_{G1}, так и являющихся циклическими сдвигами. Номер последовательности k соответствует циклическому сдвигу τ. Начальные и конечные сегменты некоторых последовательностей $F_{G1,k}$ приведены в табл. 3. Вес всех последовательностей равен $V_k = 32$.

Таблица 3

Сегменты последовательностей $F_{G1,k}$ множества ГМВ ПП FF_{G1}

$F_{G1,k}$	Символы последовательностей для k																					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	…	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
$F_{G1,0}$	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	…	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$F_{G1,1}$	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	…	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
$F_{G1,2}$	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	…	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
$F_{G1,5}$	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	…	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
$F_{G1,17}$	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	…	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0
$F_{G1,46}$	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	…	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
$F_{G1,58}$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	…	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1

Проверочные полиномы для рассмотренных последовательностей могут быть получены из выражения (4).

Значения ПВКФ последовательностей $F_{G1,1}$ и $F_{G1,2}$, входящих в множество ГМВ ПП FF_{G1}, для произвольного сдвига $\tau = 21i+j$ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения $R_{1,2}(\tau)$ ПВКФ последовательностей $F_{G1,1}$ и $F_{G1,2}$

	j																				
i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	–1	–1	15	–9	7	15	–1	–9	–9	7	15	–1	–1	–1	15	–9	–1	–9	15	–9	–9
1	–9	–1	–1	–9	–1	15	–9	–9	–1	7	–9	–1	–1	15	–9	–1	–9	–1	–1	–9	15
2	7	–9	7	–9	15	–9	–9	7	7	–1	–1	–1	–9	–9	–1	15	–1	7	7	–1	–1

Анализ показывает, что ПВКФ является четырехуровневой и принимает следующие значения (в скобках приведено число соответствующих значений для одного периода):

$$R_{1,2}(\tau) = [-9(21), -1(23), 7(9), 15(10)]. \quad (8)$$

Особенностью первого множества ГМВ ПП FF_{G1} является то, что для каждой корреляционной функции сумма значений ПВКФ равна

$$W_{G1} = \sum_{\tau=0}^{\tau=2^S-2=62} R(\tau) = 1. \quad (9)$$

Например, для выражения (8) $W_{G1} = (-9)\times 21+(-1)\times 23+7\times 9+15\times 10 = 1$.

Значения ПВКФ последовательностей $F_{G1,5}$ и $F_{G1,17}$, также входящих в множество ГМВ ПП, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения $R_{5,17}(\tau)$ ПВКФ последовательностей $F_{G1,5}$ и $F_{G1,17}$

	j																				
i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	–1	–9	–1	–9	–9	–1	–1	–1	–1	15	–1	15	–1	–1	–9	–9	–1	15	15	–1	–1
1	15	7	–9	7	–9	–9	–1	–9	–1	7	–9	7	7	15	7	15	7	–9	–9	–1	–9
2	–1	–1	–9	7	–1	–9	–1	7	–1	–1	–9	–9	7	7	–1	–9	–1	15	–9	–1	–1

ПВКФ данных последовательностей также является четырехуровневой и удовлетворяет выражению (9), но с другим распределением числа значений

$$R_{5,17}(\tau) = [-9(19), -1(25), 7(11), 15(8)].$$

Значения ПАКФ последовательностей $F_{G1,5}$ и $F_{G1,58}$, а также $F_{G1,17}$ и $F_{G1,46}$, являющихся циклическими сдвигами, приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Значения $R_{5,58}(\tau)$ ПАКФ последовательностей $F_{G1,5}$ и $F_{G1,58}$

	j																				
i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	–1	–1	7	–1	7	**63**	7	–1	7	–1	–1	–9	–9	–1	–1	–1	7	–1	15	–1	–1
1	–1	–9	–1	–9	–9	–1	–9	–1	7	7	15	–1	–9	–1	–9	–9	–9	–9	–1	–9	–1
2	15	7	7	–1	–9	–1	–9	–9	–1	–9	–1	–1	–1	15	–1	7	–1	–1	–1	–9	–9

Таблица 7

Значения $R_{17,46}(\tau)$ ПАКФ последовательностей $F_{G1,17}$ и $F_{G1,46}$

	j																				
i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	–1	7	7	–9	7	–1	–9	–1	–1	–9	–9	7	–9	–1	–1	–1	–1	**63**	–1	–1	–1
1	–1	–9	7	–9	–9	–1	–1	–9	–1	7	–9	7	7	–1	–1	15	–9	–1	7	–1	–9
2	15	–9	–1	–1	–1	–9	–1	–1	–9	–1	–1	–1	–9	15	–9	–1	7	–1	–9	15	–1

ПАКФ данных последовательностей является пятиуровневой

$$R_{5,58}(\tau) = R_{17,46}(\tau) = [-9(18), -1(30), 7(10), 15(4), 63(1)]$$

и также удовлетворяет выражению (9):

$$W_{G1} = (-9)\times 18+(-1)\times 30+7\times 10+15\times 4+63\times 1 = 1.$$

Максимальное значение ПАКФ $R(\tau) = 63$ для циклических сдвигов (выделено полужирным шрифтом) достигается при сдвигах τ, равных номерам первых последовательностей.

Таким образом, при формировании первого множества ГМВ ПП FF_{G1} его мощность определяется выражением (7) и равна $M_1 = 32$, ПВКФ является четырехуровневой и принимает следующие значения:

$$R_{ij}(\tau) = [-(2^{S/2}+1), -1, (2^{S/2}-1), (2^{S/2+1}-1)] = (-9, -1, 7, 15). \quad (10)$$

Для сравнения приведем значения трехуровневой ПВКФ последовательностей Голда для периода $N = 2^S-1 = 63$ ($S = 2\text{mod}4$) [4, 5]:

$$R_{ij}(\tau) = [-(2^{S/2+1}+1), -1, (2^{S/2+1}-1)] = (-17, -1, 15). \quad (11)$$

Отметим, что максимальное значение модуля ПВКФ последовательностей Голда на 12 % превышает аналогичное значение для множества ГМВ ПП.

Процедура формирования множества ГМВ ПП FF_{G2} основана на использовании произвольного k-го циклического сдвига базисной МП $F_{\text{МП},k}$. В этом случае при сложении последовательностей, децимированных по индексам 3 и 5, в соответствии с полиномами $h_{ci}(x)$, вместо F_G формируется ГМВ-подобная последовательность $F_{G2,k}$, ПАКФ которой является пятиуровневой [19].

В соответствии с (3) символы c_i МП, представленные в канонической форме, при циклическом сдвиге на τ определяются выражением

$$c_i = \text{tr}_{S1}\alpha^{i+\tau} = \text{tr}_{61}\alpha^{i+\tau}, \quad 0 \le i < 2^S-2 = 62. \quad (12)$$

Начальные и конечные символы МП $F_{\text{МП},k}$ в соответствии с (12) при $\tau = 5$ (сдвиг МП влево) приведены в табл. 8 (вторая строка).

Таблица 8

Символы c_i МП $F_{\text{МП},k}$ при сдвиге $\tau = 5$ и символы q_i ГМВ ПП $F_{G2,k}$

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	…	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
c_i	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	…	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
c_{3i}	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	…	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0
c_{5i}	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	…	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
q_i	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	…	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0

На основании символов базисной МП $F_{\text{МП},k}$ вида (12) формируется ГМВ-подобная последовательность с проверочным полиномом $h_G(x)$ вида (4) и ЭЛС $l_S = 12$. Символы q_i ГМВ ПП $F_{G2,k}$ могут быть получены аналогично символам g_i ГМВ-последовательности F_G путем суммирования по mod2 новых значений символов c_{3i} и c_{5i} двух последовательностей (табл. 8).

Полный набор последовательностей $F_{G2,k}$ этого множества формируется для всех возможных циклических сдвигов базисной МП. Соответственно мощность множества ГМВ ПП FF_{G2} в этом случае равна

$$M_2 = 2^S - 1 = N = 63 \quad (13)$$

с учетом исходной ГМВ-последовательности для базисной МП в канонической форме.

Последовательность $F_{G2,k}$ (k = 1—63) множества FF_{G2} удобно нумеровать в соответствии с начальным состоянием циклического сдвига базисной МП, представленным в десятичной форме. Для периода $N = 63$ при начальном состоянии $c_0 = 1$, $c_i = 0$ (i = 1—5) базисной МП в каноническом виде формируется ГМВ-последовательность $F_G = F_{G2,1}$. При остальных начальных состояниях формируются ГМВ ПП $F_{G2,k}$. В табл. 9 приведены некоторые последовательности $F_{G2,k}$ с различным весом V_k.

Таблица 9

Сегменты последовательностей $F_{G2,k}$ множества ГМВ ПП FF_{G2}

$F_{G2,k}$	V_k	Символы последовательностей для k																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	…	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
$F_{G3,1}$	32	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	…	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$F_{G3,7}$	32	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	…	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
$F_{G3,2}$	36	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	…	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
$F_{G3,5}$	36	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	…	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
$F_{G3,11}$	28	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	…	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
$F_{G3,26}$	28	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	…	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
$F_{G3,48}$	24	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	…	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
$F_{G3,60}$	24	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	…	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Множество ГМВ ПП FF_{G2} с $N = 63$ и базисной МП с проверочным полиномом $h(x) = x^6 + x + 1$ характеризуется следующим распределением весов последовательностей (в скобках указано число последовательностей):

$$V_k = [36(18), 32(28), 28(8), 24(9)]. \quad (14)$$

В табл. 10 приведено распределение числа различных значений ПВКФ последовательности $F_{G2,1}$ с последовательностями $F_{G2,k}$. Также показана сумма значений ПВКФ $W_{1,k}$ последовательности $F_{G2,1}$ с $F_{G2,k}$.

Таблица 10

Распределение значений ПВКФ последовательностей $F_{G2,1}$ и $F_{G2,k}$

k	2	3	4	5	6	7	8	9		56	57	58	59	60	61	62	63
V_k	36	36	36	36	28	32	36	36		32	32	28	28	24	36	32	32
$R_1 = -9$	18	18	18	18	21	18	18	18		18	18	21	21	18	18	18	18
$R_2 = -1$	27	27	27	27	21	29	27	27		29	29	21	21	30	27	29	29
$R_3 = 7$	9	9	9	9	14	6	9	9		6	6	14	14	6	9	6	6
$R_4 = 15$	9	9	9	9	7	10	9	9		10	10	7	7	9	9	10	10
$W_{1,k}$	9	9	9	9	–7	1	9	9		1	1	–7	–7	–15	9	1	1

В соответствии с (6) каждому значению веса V_k последовательности $F_{G2,k}$ можно формально сопоставить корреляционную функцию $R_{G2,k} = N - 2V_k$. Тогда выражение (9) для суммарной величины ПВКФ определяется произведением значений корреляционных функций:

$$W_{k,l} = \sum\nolimits_{\tau=0}^{\tau=2^S-2=62} R(\tau) = R_{G2,k} \times R_{G2,l} = (N - 2V_k)(N - 2V_l). \quad (15)$$

Так как вес последовательности $F_{G2,1}$ равен $V_1 = 32$, а веса V_l остальных последовательностей множества ГМВ ПП FF_{G2} могут принимать четыре значения (24, 28, 32 и 36), то сумма значений ПВКФ $W_{1,k} = 2V_k - N$ также может принимать четыре значения: –15, –7, 1, 9.

В табл. 11 приведены значения ПВКФ последовательности $F_{G2,2}$, вес которой составляет $V_2 = 36$, с последовательностями $F_{G2,k}$. В этом случае сумма значений ПВКФ будет равна $W_{2,k} = 9(2V_k - N)$ и также может принимать четыре значения: –135, –63, 9, 81.

Таблица 11

Распределение значений ПВКФ ГМВ ПП $F_{G2,2}$ с ГМВ ПП $F_{G2,k}$

k	3	4	5	6	7	8	9	10		56	57	58	59	60	61	62	63
V_k	36	36	36	28	32	36	36	32		32	32	28	28	24	36	32	32
$R_1 = -9$	15	15	18	17	22	14	15	15		15	19	19	20	26	11	22	16
$R_2 = -1$	27	28	20	34	20	28	28	32		32	28	31	29	24	32	22	31
$R_3 = 7$	9	7	14	7	11	10	7	8		8	4	7	8	9	11	7	7
$R_4 = 15$	12	13	11	5	10	11	13	8		8	12	6	6	4	9	12	9
$W_{2,k}$	81	81	81	–63	9	81	81	9		9	9	–63	–63	–135	81	9	9

Аналогично можно показать, что сумма значений ПВКФ последовательности $F_{G2,k}$ с весом 28 с остальными последовательностями равна $W_k = 7(N - 2V_k)$ и также принимает четыре значения: –63, –7, 49, 105.

Сумма значений ПВКФ последовательности $F_{G2,k}$ с весом 24 равна $W_k = 15(N - 2V_k)$ и принимает четыре значения: –135, –15, 105, 225.

Для проверки отсутствия циклических сдвигов среди последовательностей множества ГМВ ПП FF_{G2} с весом 24 и 28 в табл. 12 приведены значения ПВКФ последовательностей с одинаковыми весами. Для вычислений взяты последовательности $F_{G2,15}$ с весом $V_{15} = 24$ и $F_{G2,6}$ с весом $V_6 = 28$.

Таблица 12

Распределение значений ПВКФ ГМВ ПП $F_{G2,k}$ с $V_k = 24, 28$

Параметр	ПВКФ $F_{G2,15}$ с $F_{G2,k}$ с $V_k = 24$									ПВКФ $F_{G2,6}$ с $F_{G2,k}$ с $V_k = 28$							
K	22	24	32	36	38	47	48	60		k	11	20	26	28	31	58	59
V_k	24	24	24	24	24	24	24	24		V_k	28	28	28	28	28	28	28
$R_1 = -9$	8	8	10	4	12	10	12	4		$R_1 = -9$	14	14	16	16	20	12	18
$R_2 = -1$	27	27	23	33	21	23	21	33		$R_2 = -1$	29	29	26	26	20	32	23
$R_3 = 7$	12	12	14	12	12	14	12	12		$R_3 = 7$	12	12	12	12	12	12	12
$R_4 = 15$	16	16	16	14	18	16	18	14		$R_4 = 15$	8	8	9	9	11	7	10
W_{15}	225	225	225	225	225	225	225	225		W_6	49	49	49	49	49	49	49

Таким образом, определяемая выражением (13) мощность второго множества ГМВ ПП FF_{G2} с периодом $N = 63$ равна $M_2 = 63$, ПВКФ является четырехуровневой и принимает значения в соответствии с (10). Суммарная величина ПВКФ последовательностей множества удовлетворяет (15).

Для формирования множеств ГМВ ПП с периодами $N = 2^{10}–1 = 1023$; $2^{14}– 1 = 16\,383$ и $2^{18}–1 = 262\,143$ необходимо определить проверочные полиномы $h_{\text{МП}}(x)$ для базисных МП, а также пары полиномов $h_{ci}(x)$ для получения проверочных полиномов $h_G(x)$ вида (4) ГМВ-последовательностей.

В табл. 13 приведены основные характеристики множеств ГМВ ПП.

Таблица 13

Характеристика множеств ГМВ ПП с периодами $N = 2^S–1$

S	N	$h_{\text{МП}}(x)$	$h_{c1}(x)$	$h_{c2}(x)$	$M_1=2^{S-1}$	$M_2=2^S–1$	$R(\tau)$	$\lvert r_{\max}\rvert$
6	63	x^6+x+1	$h_3(x)$	$h_5(x)$	32	63	–9, –1, 7, 15	0,24
10	1023	$x^{10}+x^3+1$	$h_3(x)$	$h_{17}(x)$	512	1023	–33, –1, 31, 63	0,06
			$h_5(x)$	$h_9(x)$	512	1023	–33, –1, 31, 63	0,06
14	16383	$x^{14}+x^{10}+x^6+x+1$	$h_3(x)$	$h_{65}(x)$	8192	16383	–129, –1, 127, 255	0,016
			$h_5(x)$	$h_{33}(x)$	8192	16383	–129, –1, 127, 255	0,016
			$h_9(x)$	$h_{17}(x)$	8192	16383	–129, –1, 127, 255	0,016
18	262143	$x^{18}+x^7+1$	$h_3(x)$	$h_{257}(x)$	131072	262143	–513, –1, 511, 1023	0,004
			$h_5(x)$	$h_{129}(x)$	131072	262143	–513, –1, 511, 1023	0,004
			$h_9(x)$	$h_{65}(x)$	131072	262143	–513, –1, 511, 1023	0,004
			$h_{17}(x)$	$h_{33}(x)$	131072	262143	–513, –1, 511, 1023	0,004

При допустимых значениях S показаны полиномы $h_{\text{МП}}(x)$ для базисных МП [21], пары полиномов-сомножителей $h_{ci}(x)$ с целью получения проверочных полиномов $h_G(x)$ [20], мощности множеств M_1 и M_2, а также значения функции корреляции и коэффициента корреляции. С увеличением периода последовательностей происходит уменьшение максимально возможного значения модуля коэффициента корреляции $|r_{\max}| = |R_{\max}|/N$.

При периоде $N = 63$ для каждого из шести примитивных полиномов можно сформировать по одному множеству ГМВ ПП; при $N = 1023$ для каждого из 60 примитивных полиномов — по два множества ГМВ ПП. При периоде $N = 16\,383$ для каждого из 756 примитивных полиномов — по три множества ГМВ ПП, а при $N = 262\,143$ для каждого из 7776 примитивных полиномов — по четыре множества ГМВ ПП.

Таким образом, в статье разработаны процедуры формирования двух множеств ГМВ ПП FF_{G1} и FF_{G2}. Мощности множеств FF_{G1} и FF_{G2} определяются выражениями (7) и (13) и равны половине периода и периоду последовательностей соответственно. При этом последовательности множества FF_{G1} являются сбалансированными, их вес равен $V_1 = 2^{S-1}$.

Вес последовательностей $F_{G2,k}$ ($k = 0$—$2^{S-1}-1$) множества FF_{G2} может принимать четыре значения

$$V_2 = [2^{S/2-1}(2^{S/2}+1);\ 2^{S-1};\ 2^{S/2-1}(2^{S/2}-1);\ 2^{S/2}(2^{S/2-1}-1)]. \qquad (16)$$

ПВКФ всех последовательностей множеств FF_{G1} и FF_{G2} является четырехуровневой:

$$R_{ij}(\tau) = [-(2^{S/2}+1),\ -1,\ (2^{S/2}-1),\ (2^{S/2+1}-1)]. \qquad (17)$$

Суммарная величина ПВКФ, определяемая выражением (15), может принимать десять значений в интервале

$$W_{kl} = [-(2^{S/2}+1)(2^{S/2+1}-1)\ldots(2^{S/2+1}-1)^2].$$

Полученные результаты по формированию множеств ГМВ-подобных последовательностей могут быть использованы в СПЦИ в режиме кодового многостанционного доступа для разделения каналов связи различных абонентов наряду с фазоманипулированными сигналами на основе последовательностей Голда, Касами и др. Достоинствами предлагаемых множеств могут служить сбалансированность последовательностей $F_{G1,k}$ и более низкий, по сравнению с последовательностями Голда, уровень взаимной корреляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ипатов В. П.* Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / Пер. с англ.; под ред. *В. П. Ипатова*. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
2. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
3. *Gold R.* Maximal recursive sequences with 3-valued recursive cross-correlation functions // IEEE Trans. Inf. Theory. 1968. Vol. 14, N 1. P. 154.
4. *Golomb S. W., Gong G.* Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar. Cambridge University Press, 2005. 438 p.
5. CDMA: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. Л. *Е. Варакина и Ю. С. Шинакова*. М.: МАС, 2003. 608 с.
6. *Bose A., Soltanalian M.* Constructing Binary Sequences with Good Correlation Properties: An Efficient Analytical-Computational Interplay // IEEE Trans. Signal Process. 2018. Vol. 66, N 11. P. 2998.
7. *Shen X., Jia Y., Song X.* Constructions of binary sequence pairs of period 3p with optimal three-level correlation // IEEE Commun. Lett. 12017. Vol. 21, N 10. P. 12150.
8. *Chang H. H., Li C. P., Lee C. D., Wang S. H., Wu T. C.* Perfect Gaussian integer sequences of arbitrary composite length // IEEE Trans. Inf. Theory. 2015. Vol. 61, N 7. P. 4107.
9. *Pei S. C., Chang K. W.* Arbitrary Length Perfect Integer Sequences Using All-Pass Polynomial // IEEE Signal Processing Letters. 2019. Vol. 26, N 8. P. 1112.
10. *Pei S. C., Chang K. W.* Perfect Gaussian integer sequences of arbitrary length // IEEE Signal Processing Letters. 2015. Vol. 22, N 8. P. 1040.

11. *Lee C. D., Huang Y. P., Chang Y., Chang H. H.* Perfect Gaussian Integer Sequences of Odd Period $2^m - 1$ // IEEE Signal Processing Letters IEEE. 2015. Vol. 22, N 7. P. 881.

12. *Aly H., Winterhof A.* A Note on Hall's Sextic Residue Sequence: Correlation Measure of Order // IEEE Trans. Inf. Theory. 2020. Vol. 66, N 3. P. 1944.

13. *Song J., Babu P., Palomar D. P.* Optimization Methods for Designing Sequences with Low Autocorrelation Sidelobes // IEEE Trans. Signal Process. 2015. Vol. 63, N 5. P. 3998.

14. *Song J., Babu P., Palomar D. P.* Sequence Set Design with Good Correlation Properties Via Majorization-Minimization // IEEE Trans. Signal Process. 2016. Vol. 64, N 11. P. 2866.

15. *Yang Y., Tang X.* Generic Construction of Binary Sequences of Period 2 N with Optimal Odd Correlation Magnitude Based on Quaternary Sequences of Odd Period N // IEEE Trans. Inf. Theory. 2018. Vol. 64, N 1. P. 384.

16. *Katz D. J.* Aperiodic Crosscorrelation of Sequences Derived from Characters // IEEE Trans. Inf. Theory. 2016. Vol. 62, N 9. P. 5237.

17. *Günther C., Schmidt K. U.* Sequence Pairs with Asymptotically Optimal Aperiodic Correlation // IEEE Trans. Inf. Theory. 2019. Vol. 65, N 8. P. 5233.

18. *Zhang J. M., Tian T. T., Qi W. F., Zheng Q. X.* A New Method for Finding Affine Sub-Families of NFSR Sequences // IEEE Trans. Inf. Theory. 2019. Vol. 65, N 2. P. 1249.

19. *Владимиров С. С., Когновицкий О. С., Стародубцев В. Г.* Формирование и обработка ГМВ-подобных последовательностей на основе двойственного базиса // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5, № 4. С. 16—27.

20. *Стародубцев В. Г.* Метод синтеза последовательностей Гордона—Миллса—Велча для систем передачи дискретной информации // Радиотехника и электроника. 2020. № 2. С. 15.

21. *Питерсон У., Уэлдон Э.* Коды, исправляющие ошибки / Пер. с англ.; под ред. *Р. Л. Добрушина и С. И. Самойленко*. М.: Мир, 1976. 594 с.

Сведения об авторе

Виктор Геннадьевич Стародубцев — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств;
E-mail: vgstarod@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.22; одобрена после рецензирования 05.04.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications,* NY, John Wiley and Sons Ltd., 2005, 488 p.
2. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, 2001, 1079 p.
3. Gold R. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1968, no. 1(14), pp. 154.
4. Golomb S.W., Gong G. *Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar*, Cambridge University Press, 2005, 438 p.
5. Varakin L.E. and Shinakov Yu.S., ed., *CDMA: proshloe, nastoyashchee, budushchee* (CDMA: Past, Present, Future), Moscow, 2003, 608 p. (in Russ.)
6. Bose A., Soltanalian M. *IEEE Trans. Signal Process*, 2018, no. 11(66), pp. 2998.
7. Shen X., Jia Y., Song X. *IEEE Commun. Lett*., 2017, no. 10(21), pp. 12150.
8. Chang H.H., Li C.P., Lee C.D., Wang S.H., Wu T.C. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2015, no. 7(61), pp. 4107.
9. Pei S.C., Chang K.W. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, no. 8(26), pp. 1112.
10. Pei S.C., Chang K.W. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, no. 8(22), pp. 1040.
11. Lee C.D., Huang Y.P., Chang Y., Chang H.H. *IEEE Signal Processing Letters IEEE*, 2015, no. 7(22), pp. 881.
12. Aly H., Winterhof A. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2020, no. 3(66), pp. 1944.
13. Song J., Babu P., Palomar D.P. *IEEE Trans. Signal Process*, 2015, no. 15(63), pp. 3998.
14. Song J., Babu P., Palomar D.P. *IEEE Trans. Signal Process*, 2016, no. 11(64), pp. 2866.
15. Yang Y., Tang X. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2018, no. 1(64), pp. 384.
16. Katz D.J. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2016, no. 9(62), pp. 5237.
17. Günther C., Schmidt K.U. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2019, no. 8(65), pp. 5233.
18. Zhang J.M., Tian T.T., Qi W.F., Zheng Q.X. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2019, no. 2(65), pp. 1249.
19. Vladimirov S.S., Kognovitsky O.S., Starodubtsev V.G. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi*, 2019, no. 4(5), pp. 16–27. (in Russ.)

20. Starodubtsev V.G. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020, no. 2(65), pp. 155–159.
21. Peterson W.W., Weldon E.J. *Error-correcting Codes*, The MIT PRESS, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1972, 588 p.

Data on author

Victor G. Starodubtsev — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Technologies and Means of Automation of Processing and Analysis of Space Vehicles Information; E-mail: vgstarod@mail.ru

Received 18.03.22; approved after reviewing 05.04.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 621.3.085.42
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-394-397

УСЛОВИЕ ПОСТРОЕНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОДОВЫХ ШКАЛ ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА

А. А. Ожиганов*, П. А. Прибыткин

НИТИ „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
**aaozhiganov@itmo.ru*

Аннотация. Сформулировано и доказано необходимое и достаточное условие построения циклических корректирующих кодов для композиционных кодовых шкал, при заданных значениях минимального кодового расстояния и информационной емкости цифровых преобразователей угла.

Ключевые слова: *цифровой преобразователь угла, рекурсивная кодовая шкала, псевдослучайная кодовая шкала, композиционная кодовая шкала, считывающие элементы, исправление ошибок*

Ссылка для цитирования: *Ожиганов А. А., Прибыткин П. А.* Условие построения циклических кодов для композиционных кодовых шкал цифровых преобразователей угла // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 394—397. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-394-397.

CONDITION FOR CYCLIC CODES CONSTRUCTING FOR COMPOSITE CODE SCALES OF DIGITAL ANGLE CONVERTERS

A. A. Ozhiganov*, P. A. Pribytkin

Scientific Research Technological Institute "Avangard", St. Petersburg, Russia
**aaozhiganov@itmo.ru*

Abstract. The necessary and sufficient condition for cyclic correction codes construction for composite code scales of digital angle converters for a given minimum code distance and the information capacity of the converter, is formulated and proved.

Keywords: digital converter corner, recursive code scale, pseudo-random code scale, compositional code scale , reader elements, error correction

For citation: Ozhiganov A. A., Pribytkin P. A. Condition for cyclic codes constructing for composite code scales of digital angle converters. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 394—397 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-394-397.

Цифровые преобразователи угла (ЦПУ) с непосредственным преобразованием перемещения в код на основе считывания и использованием пространственного кодирования находят широкое применение в самых различных областях техники. Одним из основных элементов таких преобразователей является кодовая шкала (КШ). Наиболее важной характеристикой ЦПУ является правило построения структуры КШ, при заданных значениях разрядности и информационной емкости преобразователя.

В таких преобразователях КШ выполняются на основе обыкновенного двоичного кода (ОДК), или кода Грея [1—3]. Сложность структуры шкал, построенных с использованием таких кодов, а следовательно масса и габариты преобразователя, возрастают с увеличением разрешающей способности, поскольку все считывающие элементы (СЭ) размещаются на отдельных кодовых дорожках (КД) шкалы.

В [4] предложены однодорожечные рекурсивные кодовые шкалы (РКШ), которые позволяют строить на своей основе ЦПУ с улучшенными массогабаритными характеристиками. Кодовая маска РКШ выполняется в соответствии с двоичными значениями символов линейной рекурсивной последовательности (ЛРП). Свойства структуры РКШ позволяют использовать

© *Ожиганов А. А., Прибыткин П. А., 2022*

линейные соотношения на множестве циклических сдвигов образующей КШ последовательности для формирования контрольных разрядов корректирующих кодов (КК). В классе РКШ различают псевдослучайные (ПСКШ) [5] и композиционные кодовые шкалы (ККШ) [6, 7].

ККШ обладают значительными корректирующими возможностями, обусловленными их линейной рекурсивной структурой. Вес Хемминга соответствующих им двоичных последовательностей определяется выражением:

$$w = 2^{(m/2)} - \sum_{i=1}^{p} 2^{(m_i/2)}, \quad (1)$$

где $m = \sum_{i=1}^{p} m_i$ — степень образующего полинома

$$H(x) = \prod_{i=1}^{p} h_{m_i}(x), \quad (2)$$

а $h_{m_i}(x)$ — компоненты мультипликативного представления $H(x)$.

Размещение всех (как информационных, так и корректирующих) СЭ, обеспечивающих формирование кодовых слов с требуемым минимальным кодовым расстоянием $d_{\min}$, как и в случае ПСКШ, осуществляется путем суммирования значений, снимаемых с определенных информационных СЭ и последующего поиска соответствующих этим суммам циклических сдвигов, лежащих в основе образующей последовательности ККШ. Детальное описание данной процедуры для ПСКШ приведено в работе [8].

Для ККШ в силу соотношения (1) множество вычетов по модулю $H(x)$ не содержит цикла максимального периода и, следовательно, не является расширенным полем $GF(2^m)$. Поэтому метод использования циклических корректирующих кодов, применимый в ПСКШ, не может быть в полной мере перенесен в ККШ. Практически это означает, что при размещении какого-либо СЭ соответствующая контрольная сумма не является циклическим сдвигом последовательности, лежащей в основе построения ККШ.

В качестве иллюстрации такой возможности рассмотрим пример кодовой шкалы со следующими параметрами:

1) образующий полином $H(x) = x^5+x^4+1$;

2) полином размещения информационных СЭ $r_u(x) = x^6+x^3+x^2+x+1$;

3) генераторный полином $G(x) = x+1$ при $d_{\min} = 2$.

Для размещения одного корректирующего считывающего элемента, обеспечивающего контроль нечетных ошибок при правильном задании множества начальных значений, необходимо решить уравнение:

$$(x^l = x^6 + x^3 + x^2 + x + 1) \bmod [x^5 + x^4 + 1],$$

при $0 \le l \le L$, где L — период полинома $H(x)$.

Решения в данном случае не существует, так как полученное значение для l соответствует степени примитивного элемента расширенного поля Галуа, степень которого меньше степени образующего полинома $H(x)$.

В настоящей работе рассматриваются условия, при которых возможно построение циклического корректирующего кода с заданным кодовым расстоянием $d_{\min}$ и образующим полиномом ККШ $H(x)$.

Напомним, что циклическим кодом блоковой длины N называется линейное пространство полиномов $a(x) = c(x)G(x)$, где $G(x)$ делит x^N+1, а $\deg[c(x)] = N - \deg[G(x)]$. Здесь $G(x)$ носит название образующего, или генераторного, полинома кода. В случае несистематического кодирования кодовые слова генерируются путем умножения $G(x)$ на полином информационного слова $c(x)$.

Для размещения СЭ на ККШ удобно использовать другой метод кодирования, основанный на понятии проверочного полинома кода $P(x)$, определяемого в соответствии с выражением:

$$P(x) = (x^N - 1)/G(x).$$

Значения корректирующих символов определяются линейной рекурсией с коэффициентами авторегрессии, равными соответствующим коэффициентам $G(x)$. Технически процедура кодирования наглядно представляется как процесс последовательного сдвига и сложения для сдвигового регистра, имеющего линейную отрицательную обратную связь.

Чтобы установить зависимость между номерами циклических сдвигов для корректирующих СЭ и значениями контрольных сумм воспользуемся соотношением:

$$a_i(x) = x^i b(x) \bmod[P(x)], i = \deg[P(x)], ..., N-1. \quad (3)$$

Полином $b(x)$ задает начальные условия для генерации рекурсивной последовательности. Полином размещения корректирующих СЭ определяется как:

$$r_к(x) = \sum\nolimits_i x^{L_i} \text{ для } x^{L_i} = a_i(x) \bmod[H(x)]. \quad (4)$$

Для иллюстрации приведенных соображений рассмотрим код Хемминга с блоковой длиной 7 и числом проверочных символов 3 при

$$P(x) = x^4 + x^2 + x + 1;\ H(x) = x^4 + x + 1;\ b(x) = 1;$$
$$a_4(x) = x^2 + x + 1 \Longrightarrow x^9 = a_4(x) \bmod [H(x)];$$
$$a_5(x) = x^3 + x^2 + x \Longrightarrow x^{10} = a_5(x) \bmod [H(x];$$
$$a_6(x) = x^3 + x + 1 \Longrightarrow x^{12} = a_6(x) \bmod [H(x].$$

Очевидно, что совместимость уравнений (3) и (4) обеспечивает корректность размещения корректирующих СЭ. Под корректностью в данном случае понимается существование кодовых комбинаций, равных соответственно $a_i(x)$ для $i = m,\ldots, N-1$ по модулю $H(x)$.

Утверждение. Система уравнений (3)—(4) совместна тогда, и только тогда, когда имеет место:

$$\text{НОД } [H(x), x^i b(x) \bmod P(x)] = 1, \text{ для всех } i = m,\ldots, N-1; \quad (5)$$
$$\text{НОД } [H(x), b(x)] = 1, \quad (6)$$

при определенном размещении информационных СЭ, обеспечивающем линейную независимость циклических сдвигов.

Доказательство. Предположим, что условие (5) не имеет места для некоторого $a_i(x)$. Пусть $f(x)$ = НОД $[x^i b(x), H(x)]$, $H(x) = f(x)U_1(x)$. Из (3) $x^i b(x) = f(x)U_2(x)$. Из (4) для $U_1(x)$ и $U_2(x)$ имеем: $x^{L_i}U_1(x)^{-1} = f(x) = 0 \bmod[U_1(x)]$.

Очевидно, что $x^{L_i} \neq 0,\ \ U_2(x)^{-1} \neq 0,$ откуда следует необходимость (5). Достаточность вытекает из дополнительного условия (6), рассмотренного в [9]. Решение уравнений (3), (4) при выполнении (5) и (6) позволяет решить задачу размещения корректирующих СЭ.

Для практического применения в ЦПУ циклических корректирующих кодов необходимо, чтобы функциональные зависимости между символами образующей КШ последовательности имели линейный характер. При выполнении этого условия возможно построение преобразователей, формирующих известные типы циклических кодов, для которых существуют эффективные методы обнаружения и исправления ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Преснухин Л. Н., Майоров С. А., Меськин И. В., Шаньгин В. Ф.* Фотоэлектрические преобразователи информации. М.: Машиностроение, 1974. 375 с.

2. *Домрачев В. Г., Мейко Б. С.* Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 328 с.

3. *Асиновский Э. Н.* и др. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Под ред. *А. А. Ахметжанова*. М.: Энергоатомиздат, 1986. 128 с.

4. *Азов А. К., Ожиганов А. А., Тарасюк М. В*. Рекурсивные кодовые шкалы // Информационные технологии. 1998. № 6. С. 39—43.

5. *Ожиганов А. А*. Псевдослучайные кодовые шкалы // Изв. вузов. Приборостроение. 1987. Т. 30, № 2. С. 40—43.

6. *Ожиганов А. А., Тарасюк М. В*. Композиционные кодовые шкалы // Изв. вузов. Приборостроение. 1994. Т. 37, № 5—6. С. 26—29.

7. *Ожиганов А. А., Тарасюк М. В.* Размещение считывающих элементов на композиционной кодовой шкале // Изв. вузов. Приборостроение. 1997. Т. 40, № 1. С. 42—47.

8. *Ожиганов А. А.* Алгоритм размещения корректирующих считывающих элементов на псевдослучайной кодовой шкале // Изв. вузов. Приборостроение. 1995. Т. 38, № 7—8. С. 33—36.

9. *Ожиганов А. А., Тарасюк М. В*. Использование циклических корректирующих кодов в рекурсивных кодовых шкалах // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 10. С. 973—979.

Сведения об авторах

Александр Аркадьевич Ожиганов — д-р техн. наук, профессор; АО „НИТИ «Авангард»“; гл. научный сотрудник; E-mail: aaozhiganov@itmo.ru

Павел Александрович Прибыткин — канд. техн. наук; АО „НИТИ «Авангард»“; лаборатория цифровых преобразователей угла; начальник лаборатории; E-mail: immelrikt@gmail.com

Поступила в редакцию 09.03.22; одобрена после рецензирования 23.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Presnukhin L.N., Maiorov S.A., Meskin I.V., Shangin V.F. *Fotoelektricheskiye preobrazovateli informatsii* (Photoelectric Information Converters), Moscow, 1974, 375 p. (in Russ.)
2. Domrachev V.G., Meiko B.S. *Tsifrovyye preobrazovateli ugla: printsipy postroyeniya, teoriya tochnosti, metody kontrolya* (Digital Angle Transducers: Principles of Construction, Theory of Accuracy, Control Methods), Moscow, 1984, 328 p. (in Russ.)
3. Asinovsky E.N. et al. *Vysokotochnyye preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy* (High-precision Converters of Angular Displacements), Akhmetzhanov A.A., ed., Moscow, 1986, 128 p. (in Russ.)
4. Azov A.K., Ozhiganov A.A., Tarasyuk M.V. *Information Technologies*, 1998, no. 6, pp. 39–43. (in Russ.)
5. Ozhiganov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 1987, no. 2(30), pp. 40–43. (in Russ.)
6. Ozhiganov A.A., Tarasyuk M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 1994, no. 5-6(37), pp. 26–29. (in Russ.)
7. Ozhiganov A.A., Tarasyuk M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 1997, no. 1(40), pp. 42–47. (in Russ.)
8. Ozhiganov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 1995, no. 7–8(38), pp. 33–36. (in Russ.)
9. Ozhiganov A.A., Tarasyuk M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 10(60), pp. 973–979. (in Russ.)

Data on authors

Alexander A. Ozhiganov — Dr. Sci., Professor; JSC Scientific Research Technological Institute "Avangard"; Chief Researcher; E-mail: ozhiganov@itmo.ru

Pavel A. Pribytkin — PhD; JSC Scientific Research Technological Institute "Avangard", Labaratory of Digital Angle Converters; Head of the Laboratory; E-mail: immelrikt@gmail.com

Received 09.03.22; approved after reviewing 23.03.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 629.7.054.44
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-398-405

ОЦЕНКА РАЗБРОСА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ВОЗДУШНОГО ДАВЛЕНИЯ

А. А. Павловский, В. В. Солдаткин*, В. М. Солдаткин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия
**w-soldatkin@mail.ru*

Аннотация. Обоснована перспективность применения одного (интегрированного) многофункционального приемника воздушного давления (ПВД), обеспечивающего восприятие всех параметров набегающего воздушного потока, необходимых для определения высотно-скоростных характеристик движения самолета. Обоснованы требования к погрешностям восприятия воздушного давления, регламентируемым Нормами летной годности самолетов. Рассматриваются причины технологического разброса аэродинамических характеристик каналов восприятия воздушного давления при производстве многофункционального приемника. Для количественной оценки влияния технологического разброса на аэродинамические характеристики многофункционального ПВД и погрешности измерения высотно-скоростных параметров в аэродинамической трубе проведены исследования партии осесимметричных ПВД, изготовленных по одной конструкторской документации, по единой технологии на одном оборудовании и прошедших приемку ОТК по геометрическим параметрам. По результатам исследования на аттестованной аэродинамической установке, прошедшей очередную поверку, определены и построены графики изменения аэродинамических коэффициентов полного (динамического) и статического давления ПВД при скорости воздушного потока 150 км/ч и изменении угла скоса набегающего воздушного потока в диапазоне от 0 до 30°. Полученные результаты создают предпосылки для выявления требований к нормированию характеристик и обеспечению взаимозаменяемости осесимметричных многофункциональных ПВД в аэродинамических системах измерения высотно-скоростных параметров самолета и других объектов авиационной техники.

Ключевые слова: *аэрометрические системы, многофункциональный приемник, технологический разброс, аэродинамические характеристики*

Ссылка для цитирования: *Павловский А. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М.* Оценка разброса аэродинамических характеристик многофункционального приемника воздушного давления // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 398—405. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-398-405.

ESTIMATION OF THE SPREAD OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS IN MULTIFUNCTIONAL AIR PRESSURE RECEIVER

A.A. Pavlovskiy, V. V. Soldatkin*, V. M. Soldatkin

A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia
**w-soldatkin@mail.ru*

Abstract. The prospects of using a single (integrated) multifunctional air pressure receiver (APR), providing the perception of all the parameters of the incoming air flow necessary to determine the altitude and speed characteristics of the aircraft movement, are substantiated. The requirements for the air pressure perception errors regulated by the aircraft Airworthiness Standards, are justified. The reasons for the technological dispersion of the aerodynamic characteristics of the channels for the perception of air pressure in manufacturing a multifunctional receiver are considered. To quantify the effect of technological dispersion on the aerodynamic characteristics of a multifunctional APR and the measurement errors of altitude and speed parameters in the wind tunnel, studies of a batch of axisymmetric APR manufactured according to the same design documentation and the same technology on the same equipment and passed the acceptance of the QC department according to geometric parameters are carried out. According to results of the study on a certified aerodynamic installation that has passed the next verification, graphs of the change in the aerodynamic coefficients of the total (dynamic) and static pressure of the APR at the air flow velocity of 150 km/h and the change in the angle of bevel of the incoming airflow in the range from 0 to 30° are determined and constructed. The obtained results create prerequisites for identifying requirements for normalization of characteristics and ensuring the interchangeability of axisymmetric multifunctional APR in aerodynamic systems for measuring the altitude and speed parameters of aircraft and other objects of aviation equipment.

© Павловский А. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М., 2022

Keywords: aerometric systems, multifunctional receiver, technological spread, aerodynamic characteristics

For citation: Pavlovskiy A. A., Soldatkin V. V., Soldatkin V. M. Estimation of the spread of aerodynamic characteristics in multifunctional air pressure receiver. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 398—405 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-398-405.

Введение. Полеты широкого класса авиационной техники, в частности самолета, осуществляются в пределах атмосферы, и для их выполнения в штурвальном и автоматическом режимах необходима информация о высотно-скоростных параметрах движения относительно окружающей воздушной среды [1, 2].

В качестве первичной информации аэрометрических систем измерения высотно-скоростных параметров используются характеристики набегающего воздушного потока — полное и статическое давление, углы направления потока в азимутальной и ортогональной ей плоскостях [3]. В традиционных аэрометрических системах измерения высотно-скоростных параметров движения самолета для восприятия первичной информации набегающего воздушного потока используются устанавливаемые на правом и левом борту и распределенные по фюзеляжу приемники полного и статического воздушного давления (ПВД), флюгерные или другие датчики аэродинамических углов (ДАУ) — углов атаки и скольжения, выходные сигналы которых по кабелям связи и пневмопроводам связаны с расположенным за фюзеляжем бортовым вычислителем [4]. При этом множество автономных приемников и датчиков первичной информации, пневмопроводов и кабелей связи усложняют конструкцию, увеличивают массу и стоимость таких аэрометрических систем, ограничивают область их применения на объектах авиационной техники, определяют актуальность разработки интегрированных многофункциональных приемников первичной информации аэрометрических систем [5, 6].

Разрабатываются многофункциональные ПВД, функции традиционных (классических) приемников в которых совмещаются с восприятием дополнительной информации об аэродинамических углах атаки и скольжения. При этом одним из перспективных вариантов является осесимметричный многофункциональный ПВД [7, 8].

Оценка разброса аэродинамических характеристик каналов полного и статического давления при производстве многофункциональных ПВД. Важным требованием, предъявляемым к многофункциональному ПВД, является обеспечение идентичности аэродинамических характеристик каналов восприятия полного $P_{\text{п}}$ и статического P_H давления при производстве ПВД и их стабильность при изменении углов скоса набегающего воздушного потока.

В соответствии с Нормами летной годности самолетов [9], погрешность ΔP_H восприятия статического давления P_H на высоте полета H каждого ПВД, в том числе многофункционального, не должна превышать 5 % от скоростного напора q набегающего воздушного потока. Следовательно, аэродинамический коэффициент статического давления $\overline{P}$ многофункционального ПВД должен удовлетворять условию

$$\overline{P} = \frac{P_x - P_H}{q} \le \pm 0,05,$$

где P_x — статическое давление на выходе многофункционального ПВД; P_H — статическое давление набегающего воздушного потока на высоте полета H; $q = \frac{\rho_H V^2}{2}$ — скоростной напор набегающего воздушного потока, имеющий скорость V; ρ_H — плотность воздуха на высоте H.

Погрешность восприятия полного давления $P_{\text{п}}$ классических (традиционных) и многофункционального ПВД не должна превышать ±1 % от скоростного напора. Следовательно, аэродинамический коэффициент полного давления многофункционального ПВД должен соответствовать требованию

$$\overline{P}_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}} - P_H}{q} = \frac{P_{\text{дин}}}{q} = \overline{P}_{\text{дин}} \le \pm 0,01,$$

где $P_{\text{дин}} = P_{\text{п}} - P_H$ — динамическое давление набегающего воздушного потока; $\overline{P}_{\text{дин}} = \overline{P}_{\text{п}}$ — аэродинамический коэффициент динамического давления многофункционального ПВД.

Как показано в работах [10, 11], технологический разброс геометрических параметров от номинальных значений, качество изготовления отверстий для восприятия входного давления и другие факторы являются причиной изменения воспринимаемых давлений $P_{\text{п}}$, $P_{\text{дин}}$, P_H и неидентичности аэродинамических характеристик каналов восприятия полного (динамического) и статического давления классических (традиционных) и многофункционального ПВД [10, 11]. На угловые характеристики канала восприятия полного давления влияют тип воспринимающей части и соотношение размера внутреннего и внешнего диаметров приемника полного давления, а также параметры формы приемной части приемника, диаметр и число дренажных отверстий.

С отклонениями диаметров цилиндрической части приемника и отверстий для забора статического давления связано изменение последнего, а также с отклонениями удаления отверстий от начала цилиндрической части и ее длины, отклонениями от вертикали углового положения отверстий, а кроме того, с шероховатостью обтекаемой поверхности. Кроме того, аэродинамические коэффициенты $\overline{P}_{\text{п}}$, $\overline{P}_{\text{дин}}$, $\overline{P}_H$ зависят от скорости V набегающего воздушного потока, что затрудняет их расчет.

Для оценки разброса аэродинамических характеристик каналов полного и статического давления при производстве многофункциональных ПВД исследованы характеристики традиционных ПВД в аэродинамической трубе. Объектом исследования являлась партия из десяти ПВД, изготовленных по одной конструкторской документации по единой технологии, на одном оборудовании и прошедших приемку ОТК по геометрическим параметрам. Приемники размещались в рабочей части установки измерительной аэродинамической типа ЭМС-0,1/60, прошедшей очередную поверку. Исследовались угловые характеристики каждого приемника данной партии. Средняя скорость воздушного потока задавалась равной 41,7 м/с (150 км/ч). Коэффициенты статического $\overline{P}$ и полного (динамического) давления $\overline{P}_{\text{дин}} = \overline{P}_{\text{п}}$ рассчитывались после замеров для каждого исследуемого образца с помощью приборов.

На рис. 1 приведены графики, иллюстрирующие разброс коэффициентов полного (динамического) давления серии ПВД при изменении угла скоса φ набегающего потока в диапазоне от 0 до 30º.

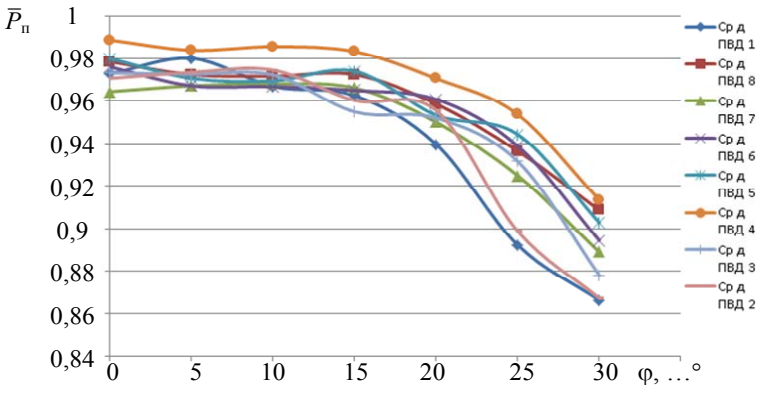


Рис. 1

Как видно из рис. 1, разброс значений коэффициента полного (динамического) давления исследуемой партии ПВД при изменении угла скоса потока от 0 до 20º находится в пределах 0,03q, для φ = 20—25º — увеличивается до 0,07q.

Если в качестве эталонного принять ПВД *1*, то относительный разброс отклонений коэффи-

циентов полного (динамического) давления остальных приемников (в процентах) можно проиллюстрировать с помощью рис. 2.

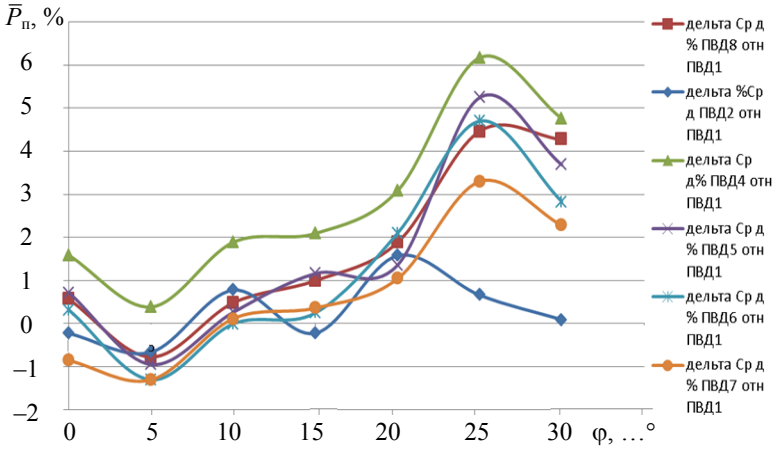


Рис. 2

Как видно из рис. 2, разброс коэффициентов полного (динамического) давления исследуемой партии находится в интервале от ±1,5 % при φ = 0 и до 6 % при φ = 25°.

На рис. 3 иллюстрируется различие в определении воздушной скорости $V_в$ исследуемой партии приемников относительно эталонного ПВД *1*, обусловленное неидентичностью коэффициентов полного (динамического) давления ПВД.

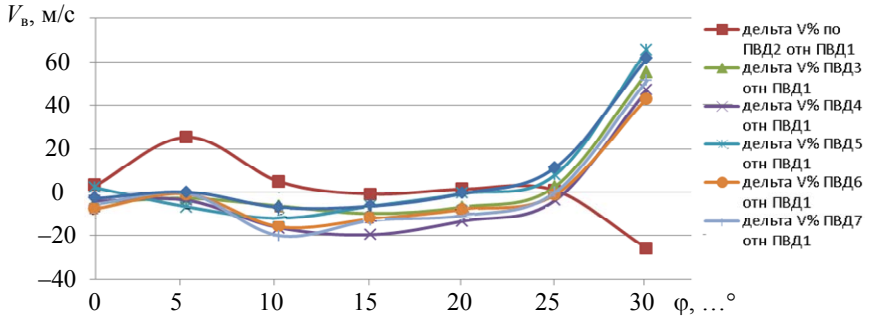


Рис. 3

Как видно из рис. 3, разброс в определяемых значениях воздушной скорости исследуемых приемников относительно эталонного ПВД *1* при φ = 0 составляет 8 %, в диапазоне φ ≤ 25° увеличивается до 20—25 %.

На рис. 4 иллюстрируются изменения коэффициента статического давления исследуемой партии приемников при изменении угла скоса набегающего воздушного потока.

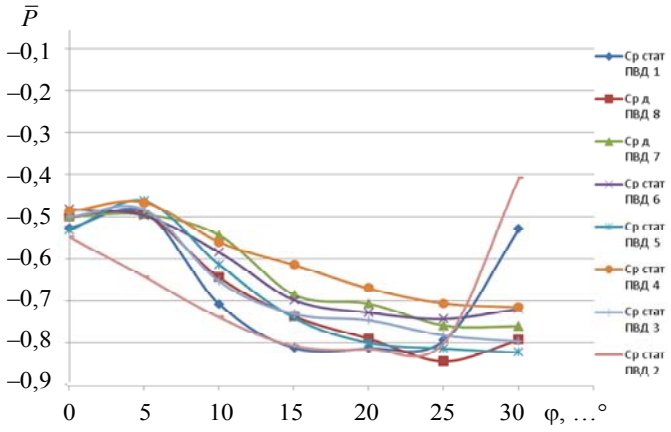


Рис. 4

Как видно из рис. 4, разброс значений коэффициента статического давления исследуемой партии ПВД изменяется от 0,05 — при φ = 0; 0,2 при φ = 15° и 0,15 при φ = 25°.

На рис. 5 приводятся графики процентного отклонения δH в определении погрешности ΔH барометрической высоты H партии приемников относительно эталонного ПВД *1*. Как видно из рис. 5, разброс δH исследуемой партии ПВД 5 % (0,05) $\varphi = 0$, в диапазоне $\varphi = 0$—25º возрастает до 12 % (0,12).

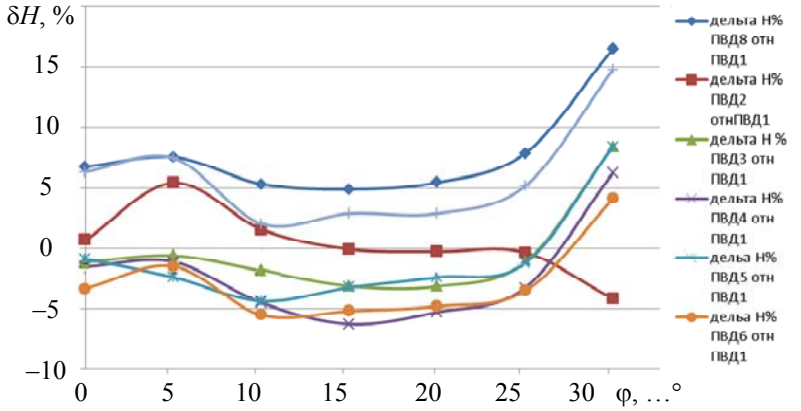


Рис. 5

Таким образом, экспериментальные исследования партии ПВД свидетельствуют о существенном разбросе их аэродинамических характеристик по каналам статического и полного (динамического) давления. Это определяет необходимость индивидуальной калибровки и паспортизации каждого приемника, по результатам которой определяются индивидуальные аэродинамические характеристики каналов полного (динамического) и статического давления каждого ПВД, проводится их отбраковка и паспортизация.

Оценка влияния качества изготовления канала на разброс характеристик многофункциональных ПВД по аэродинамическим углам. Как показано выше, для получения информации по измеряемому аэродинамическому углу, например углу атаки α, на передней обтекаемой поверхности осесимметричного многофункционального ПВД ортогонально поверхности устанавливаются отверстия для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$ и $P_{\alpha 2}$ [8]:

$$P_{\alpha 1} = P_H + \frac{\rho_H V^2}{2}[1 - K_\phi \sin^2(\theta_0 + \alpha)] = P_H + q[1 - \sin^2(\theta_0 + \alpha)];$$
$$P_{\alpha 2} = P_H + \frac{\rho_H V^2}{2}[1 - K_\phi \sin^2(\theta_0 - \alpha)] = P_H + q[1 - \sin^2(\theta_0 - \alpha)], \quad (1)$$

где θ_0 — угол между касательными к поверхности приемника в симметричных точках расположения отверстий; $K_\phi = 1$ — коэффициент формы в точке расположения отверстий.

На аэродинамические характеристики и качество канала восприятия аэродинамического угла многофункционального ПВД влияют конструктивные параметры входных кромок и форма отверстий для восприятия давлений в точках обтекаемой поверхности и углы θ_{01}, θ_{02} касательных к точкам расположения отверстий.

Информативный перепад значений давления канала восприятия аэродинамического угла, определяющий величину и знак изменения аэродинамического угла, составляет

$$\Delta P_\alpha = P_{\alpha 1} - P_{\alpha 2} + \frac{\rho_H V^2}{2}[\sin^2(\theta_{01} + \alpha) - \sin^2(\theta_{02} + \alpha)]. \quad (2)$$

Следовательно, разброс характеристик по каналу аэродинамического угла осесимметричного многофункционального ПВД будет определяться качеством отверстий восприятия статического давления P_H и разбросом $\Delta\theta_0$ значений угла θ_0 установки отверстий для восприятия давлений P_{H1}, P_{H2} на поверхности осесимметричного многофункционального ПВД.

Информативный перепад значений давления идеального канала восприятия аэродинамического угла многофункционального ПВД равен

$$\Delta P_\alpha = \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\theta_0 \sin 2\alpha \,. \tag{3}$$

Алгоритм определения аэродинамического угла имеет вид

$$\sin 2\alpha = \frac{1}{\sin 2\theta_0} \frac{\Delta P_\alpha}{q} = \frac{1}{\sin 2\theta_0} \Delta \overline{P}_\alpha \,, \tag{4}$$

где $\Delta \overline{P}_\alpha$ — аэродинамический коэффициент канала восприятия информативного перепада значений давления по аэродинамическому углу α осесимметричного многофункционального ПВД.

Тогда разброс $\Delta\alpha_P$ значений измеряемого аэродинамического угла, обусловленный качеством изготовления элементов канала восприятия аэродинамического угла осесимметричного многофункционального ПВД, можно оценить соотношением

$$\Delta\alpha_p = \frac{\cos\theta_0}{\cos 2\alpha \sin^2 2\theta_0} \Delta\theta + \frac{1}{2\cos 2\alpha \sin 2\theta_0} \Delta\left(\Delta \overline{P}_\alpha\right). \tag{5}$$

При θ_0=45º получим

$$\Delta\alpha_p = \frac{\sqrt{2}}{2\cos 2\alpha} \Delta\theta + \frac{1}{2\cos 2\alpha} \Delta\left(\Delta \overline{P}_\alpha\right). \tag{6}$$

Следовательно, разброс аэродинамических характеристик осесимметричных многофункциональных ПВД по аэродинамическому углу будет определяться разбросом $\Delta\theta_0$ угла θ_0 установки отверстий для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$ и разбросом аэродинамических коэффициентов канала восприятия $\Delta \overline{P}_\alpha$. Величина разброса $\Delta\alpha_P$ зависит от измеряемого угла α и принимает наибольшее значение на границах диапазона измерения аэродинамического угла. При α = ±25º, cos2α = 0,64, и выражение (5) принимает вид

$$\Delta\alpha_{P_{\max}} = 1{,}1\Delta\theta_0 + 0{,}78\Delta\left(\Delta \overline{P}_\alpha\right). \tag{7}$$

Первая составляющая определяется технологическими допусками на форму рабочей поверхности, местом расположения и угловым положением отверстий для восприятия $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$. Ее можно оценить удвоенным значением допуска $\Delta\theta_{12}$ на угловое положение отверстий.

Условия обтекания отверстий для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$ близки к условиям обтекания отверстий для восприятия статического давления P_H классического (традиционного) ПВД. Поэтому значение разброса $\Delta\left(\Delta \overline{P}_\alpha\right)$ можно принять близким к значению разброса $\Delta \overline{P}_H$ канала восприятия статического давления, т.е. $\Delta(\Delta \overline{P}_\alpha) \approx \Delta \overline{P}_H$. Как показали результаты исследования разброса $\Delta \overline{P}_H$ аэродинамических коэффициентов статического давления $\overline{P}_H$ партии традиционных ПВД, в диапазоне изменения аэродинамического угла α = ±25º $\Delta \overline{P}_H$ не превышает 0,2. Тогда если допуск $\Delta\theta_{1,2}$ на угловое положение отверстий для восприятия давлений $P_{\alpha 1}$, $P_{\alpha 2}$ определяется значением $\Delta\theta_{1,2} = 0{,}05$º, величину разброса $\Delta\alpha_{P\max}$ можно оценить значением $\Delta\alpha_{P\max} = 1{,}1 \cdot 2 \cdot 0{,}05 + 0{,}78 \cdot 0{,}2 = 0{,}28$º.

Рассмотренный подход создает предпосылки для выявления требований к технологическому допуску и разбросу аэродинамических характеристик канала восприятия давлений по аэродинамическим углам осесимметричного многофункционального ПВД при заданных требованиях к точности определения измеряемого аэродинамического угла, например, угла атаки.

Заключение. Таким образом, контроль качества исполнения каналов восприятия полного и статического давления и давлений, характеризующих аэродинамические углы атаки и скольжения, не обеспечивает требований, регламентируемых Нормами летной годности самолетов для аэродинамических характеристик многофункциональных ПВД, а также их взаимозаменяемость в аэрометрических системах. Это определяет необходимость индивидуальной калибровки и паспортизации многофункциональных ПВД по результатам исследования в аэродинамической трубе,

определения индивидуальных аэродинамических характеристик, отбраковки и паспортизации каждого приемника по аэродинамическим характеристикам. Полученные результаты создают предпосылки для выявления требований к нормированию аэродинамических характеристик и обеспечению взаимозаменяемости осесимметричных многофункциональных приемников воздушного давления в аэрометрических системах измерения высотно-скоростных параметров с учетом особенностей объекта авиационной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практическая аэродинамика маневренных самолетов / Под общ. ред. *Н. М. Лысенко*. М.: Воениздат, 1977. 439 с.
2. *Боднер В. А.* Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1973. 504 с.
3. *Воробьев В. Г., Глухов В. В.* Авиационные приборы и измерительные системы. М.: Транспорт, 1981. 391 с.
4. *Клюев Г. И., Макаров Н. Н., Солдаткин В. М., Ефимов И. П.* Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: учеб. пос. / Под ред. *В. А. Мишина*. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2005. 509 с.
5. *Макаров Н. Н.* Теоретические основы построения интегрированной системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса самолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. № 4. С. 48—52.
6. *Крылов Д. Л., Солдаткина Е. С.* Система воздушных сигналов самолета с неподвижным приемником потока // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 94—104.
7. *Ефремова Е. С.* Модели сигналов, алгоритмов и погрешностей измерительных каналов системы воздушных сигналов на основе вихревого метода // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 3. С. 97—103.
8. *Солдаткин В. В., Солдаткин В. М., Деревянкин В. П.* Модели сигналов, характеристик и погрешностей осесимметричного многофункционального приемника воздушных давлений аэрометрических систем самолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 98—103.
9. Авиационные правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. М.: Авиаиздат, 2011. 266 с.
10. *Деревянкин В. П., Павлинов В. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М.* Влияние конструктивных параметров приемников воздушных давлений на их аэродинамических характеристиках // Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева. 2018. № 4. С. 88—93.
11. *Берг А. Г., Деревянкин В. П., Павлинов В. А. Павловский А. А., Солдаткин В. М.* Взаимозаменяемость, калибровка и паспортизация приемников давлений по аэродинамическим характеристикам // Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. Т. 75, № 3. С. 113—120.

Сведения об авторах

Александр Андреевич Павловский — АО „Ульяновское конструкторское бюро приборостроения“; лаборатория аэродинамики; начальник лаборатории; E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Вячеслав Владимирович Солдаткин — д-р техн. наук, профессор; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Владимир Михайлович Солдаткин — д-р техн. наук, профессор; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Поступила в редакцию 02.02.22; одобрена после рецензирования 28.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Lysenko N.M., ed., *Prakticheskaya aerodinamika manevrennykh samoletov* (Practical Aerodynamics of Maneuverable Aircraft), Moscow, 1977, 439 p. (in Russ.)
2. Bodner V.A. *Sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami* (Aircraft Control Systems), Moscow, 1973, 504 p. (in Russ.)

3. Vorob'yev V.G., Glukhov V.V. *Aviatsionnyye pribory i izmeritel'nyye sistemy* (Aviation Instruments and Measuring Systems), Moscow, 1981, 391 p. (in Russ.)
4. Klyuev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Efimov I.P. *Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov* (Aircraft Aerodynamic Parameters Meters), Ulyanovsk, 2005, 509 p. (in Russ.)
5. Makarov N.N. *Russian Aeronautics*, 2007, no. 4, pp. 48–52. (in Russ.)
6. Krylov D.L. and Soldatkina E.S. *Russian Aeronautics*, 2015, no. 4, pp. 94–104. (in Russ.)
7. Efremova E.S. and Soldatkin V.M. *Russian Aeronautics*, 2020, no. 3, pp. 97–103. (in Russ.)
8. Soldatkin V.V., Soldatkin V.M., and Derevyankin V.P. *Russian Aeronautics*, 2021, no. 1, pp. 98–103. (in Russ.)
9. *Aviatsionnyye pravila. Chast' 25. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii* (Aviation Rules. Part 25. Airworthiness Standards for Transport Category Aircraft), Moscow, 2011, 266 p. (in Russ.)
10. Derevyankin V.P., Pavlinov V.A., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. *Bulletin of the Kazan State Technical University A.N. Tupolev*, 2018, no. 4, pp. 88–93. (in Russ.)
11. Berg A.G., Derevyankin V.P., Pavlinov V.A. Pavlovsky A.A., Soldatkin V.M. *Bulletin of the Kazan State Technical University A.N. Tupolev,* 2019, no. 3(75), pp. 113–120. (in Russ.)

Data on authors

Alexander A. Pavlovskiy — JSC Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau; Head of the Aerodynamics laboratory; E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Vyacheslav V. Soldatkin — Dr. Sci., Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Vladimir M. Soldatkin — Dr. Sci., Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; E-mail: w-soldatkin@mail.ru

Received 02.02.22; approved after reviewing 28.03.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 621.391.64
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-406-412

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ И СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТА

А. О. Зеневич, С. В. Жданович, Е. В. Новиков,
Т. А. Матковская*, Т. Г. Коваленко

Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь,
**tandem7m@gmail.com*

Аннотация. В настоящее время основной средой передачи данных стали волоконно-оптические линии связи, а для мониторинга состояния различных объектов все чаще начинают использоваться волоконно-оптические датчики, чувствительным элементом которых являются участки оптического волокна с макроизгибами. Показана возможность совмещения на базе одного волокна волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга состояния объекта. При этом для передачи информации предложено использовать длину волны 1310 нм, а для системы мониторинга состояния объекта — 1490, 1550 и 1625 нм. Предложена экспериментальная установка, обеспечивающая возможность одновременного использования оптического волокна для передачи данных и съема информации с системы мониторинга. Установлены параметры макроизгибов оптического волокна, которые можно использовать в датчиках системы мониторинга. Показано, что макроизгибы с такими параметрами практически не вносят дополнительного ослабления оптического излучения на длине волны 1310 нм. Определено максимальное количество датчиков, которые могут использоваться в системе мониторинга при таких параметрах макроизгибов. Результаты исследований могут найти применение при создании телекоммуникационных систем, совмещенных с системами мониторинга состояния объектов.

Ключевые слова: *волоконно-оптическая линия связи, системы мониторинга состояния объекта, макроизгиб, ослабление мощности оптического излучения*

Ссылка для цитирования: *Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. Г.* Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 406—412. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-406-412.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF COMBINING A FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINE AND AN OBJECT MONITORING SYSTEM

A. O. Zenevich, S. V. Zhdanovich, E. V. Novikov,
T. A. Matkovskaia*, T. G. Kovalenko

Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus
**tandem7m@gmail.com*

Abstract. Currently, fiber-optic communication lines have become the main medium for data transmission, and fiber-optic sensors are increasingly being used to monitor the state of various objects, the sensitive element of which are sections of optical fiber with macro-bends. The possibility of combining a fiber-optic communication line and an object condition monitoring system on the basis of a single fiber is shown. It is proposed to use a wavelength of 1310 nm for transmitting information, and 1490, 1550 and 1625 nm for monitoring the state of the object. An experimental setup is proposed, which provides the possibility of simultaneous use of optical fiber for data transmission and information retrieval from the monitoring system. Parameters of the optical fiber macro bends that can be used in the sensors of the monitoring system are obtained. It is shown that macro-bends with such parameters practically do not contribute to additional attenuation of optical radiation at a wavelength of 1310 nm. The maximum number of sensors that can be used in

© Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. Г., 2022

the monitoring system with such macro-bending parameters is determined. The results of the research can be used in the creation of telecommunication systems combined with systems for monitoring the condition of objects.

Keywords: fiber-optic communication line, systems for object state monitoring, macro-bending, attenuation of optical radiation power

For citation: Zenevich A.O., Zhdanovich S. V., Novikov E. V., Matkovskaia T. A., Kovalenko T. G. Investigation of the possibility of combining a fiber-optic communication line and an object monitoring system. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 406—412 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-406-412.

Введение. В настоящее время основной средой передачи данных служат волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [1—4]. Для мониторинга состояния различных объектов все чаще начинают использоваться волоконно-оптические датчики [5—7]. Такие датчики имеют ряд преимуществ перед традиционными электрическими, в частности, электробезопасность и невосприимчивость к электромагнитным воздействиям. Кроме того, важно отметить принципиальную возможность реализации подобных датчиков на базе оптических волокон, по которым осуществляется передача данных.

Для создания волоконно-оптических датчиков можно использовать промышленно выпускаемые оптические волокна, которые производятся в достаточно широком ассортименте [8]. В связи с этим необходим анализ условий, при выполнении которых возможно совмещение волоконно-оптических линий связи и систем мониторинга состояния объектов, построенных на основе волоконно-оптических датчиков. Такое совмещение позволит значительно снизить себестоимость системы мониторинга.

На сегодняшний день возможность такого совмещения не изучена. Поэтому целью представленных в настоящей статье исследований является установление возможности обеспечения совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга состояния объекта и определение необходимых условий.

Экспериментальная установка и методика исследований. Для проведения исследований создана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

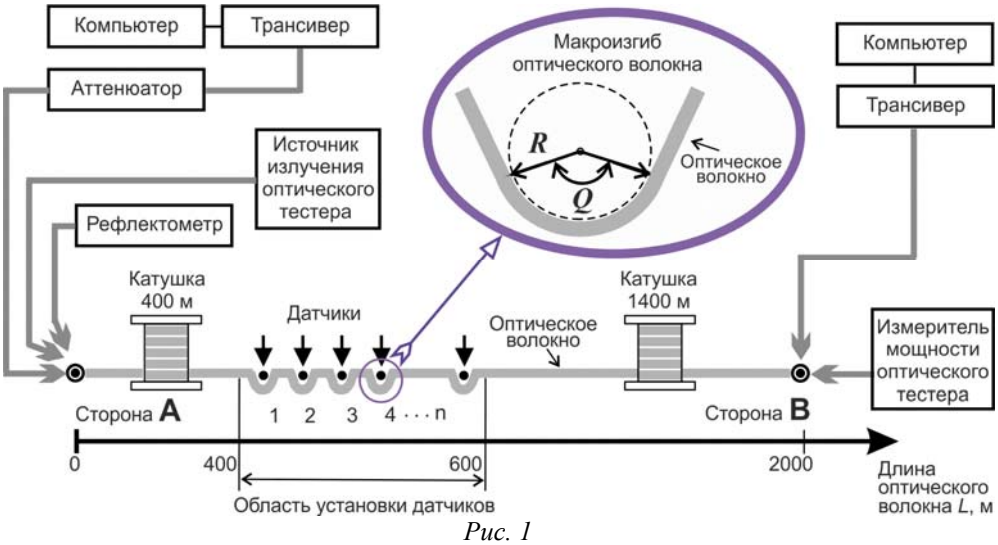


Рис. 1

Установка содержит волоконно-оптическую линию связи протяженностью 2 км, построенную на базе одномодового оптического волокна G655. Этот тип волокна достаточно восприимчив к появлению макроизгибов [9]. Под восприимчивостью понимается зависимость величины ослабления мощности оптического излучения в волокне от показанных на рис. 1 параметров макроизгиба: радиуса R и длины дуги $L_д = QR$ (Q — центральный угол дуги окружности макроизгиба). Область размещения датчиков находится в 400—600 м от стороны A

оптического волокна линии связи (см. рис. 1). В качестве чувствительного элемента датчиков использовалось само оптическое волокно.

Принцип работы датчиков основан на формировании макроизгиба оптического волокна при внешнем воздействии на датчик. Конструкция датчиков позволяет пропорционально величине воздействия изменять значение R или Q, как это показано в работе [10]. Появление макроизгиба приводит к ослаблению мощности оптического излучения в волокне. По значению вносимого макроизгибом ослабления мощности излучения можно определять величину воздействия.

Ослабление мощности оптического излучения, вносимое каждым датчиком в отдельности, измерялось поверенным и калиброванным рефлектометром FX300, подключаемым к оптическому волокну, как это показано на рис. 1. Исследования осуществлялись на длинах волн 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, которые соответствуют окнам прозрачности одномодового оптического волокна [11, 12]. Суммарное ослабление мощности, вносимое макроизгибами оптического волокна, измерялось поверенным и калиброванным оптическим тестером ОТ-3-1. При этом источник оптического излучения подключался с одной стороны оптического волокна, а измеритель мощности — с другой (см. рис. 1).

Для исследования параметров передачи данных в линии связи к оптическому волокну со стороны A и со стороны B с помощью трансиверов подключались два компьютера, имитирующие оптоволоконную систему передачи данных по технологии GigabitEthernet (1000BASE-LX) на длине волны 1310 нм. Обмен данными между компьютерами осуществлялся отдельными блоками большого размера. Установленное на этих компьютерах программное обеспечение позволяло управлять размером блоков и определять скорость передачи данных. Для ее измерения при различных значениях ослабления мощности оптического излучения в линии связи в экспериментальной установке использовались калиброванные аттенюаторы с фиксированной величиной затухания, которые включались между трансивером и линией связи.

Измерения проводились в соответствии с требованиями, определяемыми ГОСТ ISO/IEC 17025-2019*. При этом контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °C, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 ГПа.

Результаты исследований и их обсуждение. При совмещении волоконно-оптических линий связи и систем мониторинга состояния объектов необходимо определить влияние на скорость передачи данных по линии связи величины ослабления мощности оптического излучения, которое вносят датчики системы мониторинга. На рис. 2 представлена зависимость скорости передачи данных S от величины ослабления оптического излучения D для длины волны 1310 нм (кривая *1*). Как и следовало ожидать, увеличение ослабления излучения приводило к снижению скорости передачи данных, а затем к полному прекращению передачи.

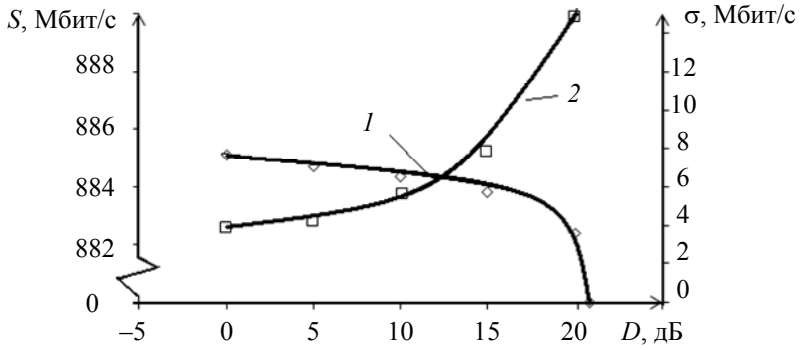


Рис. 2

* ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 „Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий“.

На рис. 2 также представлена зависимость среднеквадратичного отклонения скорости передачи информации σ (кривая *2*) от ослабления излучения. При повышении *D* наблюдается возрастание σ, что связано с увеличением числа ошибок регистрации. При $D > 20$ дБ передача данных полностью прекращается. Таким образом, ослабление мощности оптического излучения, которое вносят датчики системы мониторинга в линию связи, не должно превышать 20 дБ. Необходимо отметить, что при введении ослабления мощности оптического излучения $D < 20$ дБ зарегистрированное снижение скорости передачи данных по линии связи было соизмеримо с погрешностью измерения скорости передачи (см. рис. 2). Поэтому можно утверждать, что такое ослабление мощности оптического излучения незначительно влияет на скорость передачи данных.

Для определения параметров макроизгибов, которые можно использовать в датчиках системы мониторинга, совмещенной с линией связи, необходимо знать зависимость величины ослабления *D*, вносимого макроизгибом, от его радиуса *R* при разных значениях центрального угла дуги окружности *Q*. Поэтому получены зависимости величины ослабления мощности оптического излучения *D*, вносимого макроизгибами датчиков, от радиуса макроизгибов оптического волокна при постоянном значении *Q*. Эти зависимости представлены на рис. 3 для макроизгибов с углами $Q = \pi/2$ (кривые *1*—*4*) и π (*1′*—*4′*) при длине волны: *1*, *1′* — 1310; *2*, *2′* — 1490; *3*, *3′* — 1550; *4*, *4′* — 1625 нм.

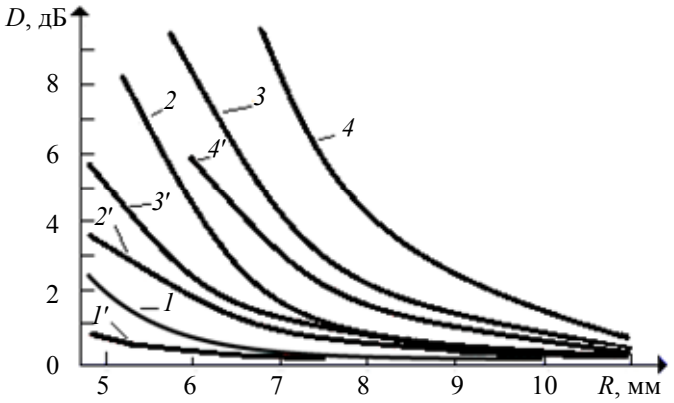


Рис. 3

Зависимости показывают, что макроизгибы одного и того же радиуса при постоянном значении *Q* характеризуются различными значениями *D* на разных длинах волн оптического излучения. При этом наибольшее ослабление мощности оптического излучения наблюдается при длине волны оптического излучения 1625 нм, а наименьшее — при 1310 нм вне зависимости от угла *Q*. Так, для радиуса макроизгиба 10 мм и $Q = \pi$ ослабление мощности оптического излучения на длине волны 1625 нм составляет 1,5 дБ, а на 1310 нм — менее 0,1 дБ. При этом же радиусе макроизгиба и $Q = \pi/2$ на длине волны 1625 нм $D = 0{,}8$ дБ, а на длине волны 1310 нм ослаблением мощности оптического излучения в волокне можно пренебречь. Эффект связан с тем, что в изогнутой части оптического волокна центр модового пятна смещается относительно оси волокна на величину, зависящую от радиуса макроизгиба. В месте перехода прямой части волокна в изогнутую происходит смещение модового пятна, и только часть мощности передается в сердцевину изогнутой части. Другая часть этой мощности переходит в оболочку оптического волокна и поглощается, причем величина поглощаемой мощности зависит от диаметра модового пятна, который возрастает с увеличением длины волны оптического излучения. Чем сильней изогнуто волокно и больше длина волны оптического излучения, тем большая часть мощности оптического излучения переходит в оболочку и теряется.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что существует возможность подобрать такие радиус и угол, при которых макроизгиб не будет существенно ослаблять мощность

оптического излучения на одной длине волны, а на другой длине величина ослабления будет достаточной для обеспечения функционирования датчика.

Экспериментальным путем определены параметры четырех макроизгибов оптического волокна, такие, чтобы каждый из макроизгибов начинал вносить заметное ослабление мощности оптического излучения с определенной длины волны. Параметры подобранных макроизгибов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры макроизгибов оптического волокна

Номер макроизгиба	*R*, мм	*Q*, рад
1	6	2/3π
2	8	π/2
3	10	3/5 π
4	13	7/8 π

Эти макроизгибы были созданы в оптическом волокне на расстоянии 30 м друг от друга. На рис. 4 представлены рефлектограммы участка волокна, на котором располагались макроизгибы, для различных длин волн (цифры *1*—*4* соответствуют номеру макроизгиба). Как видно из рис. 4, для длины волны 1310 нм наблюдается только один макроизгиб. На рефлектограмме для 1490 нм видны два макроизгиба, а для 1550 нм отображаются три макроизгиба. Для длины волны 1625 нм на рефлектограмме видны все четыре макроизгиба.

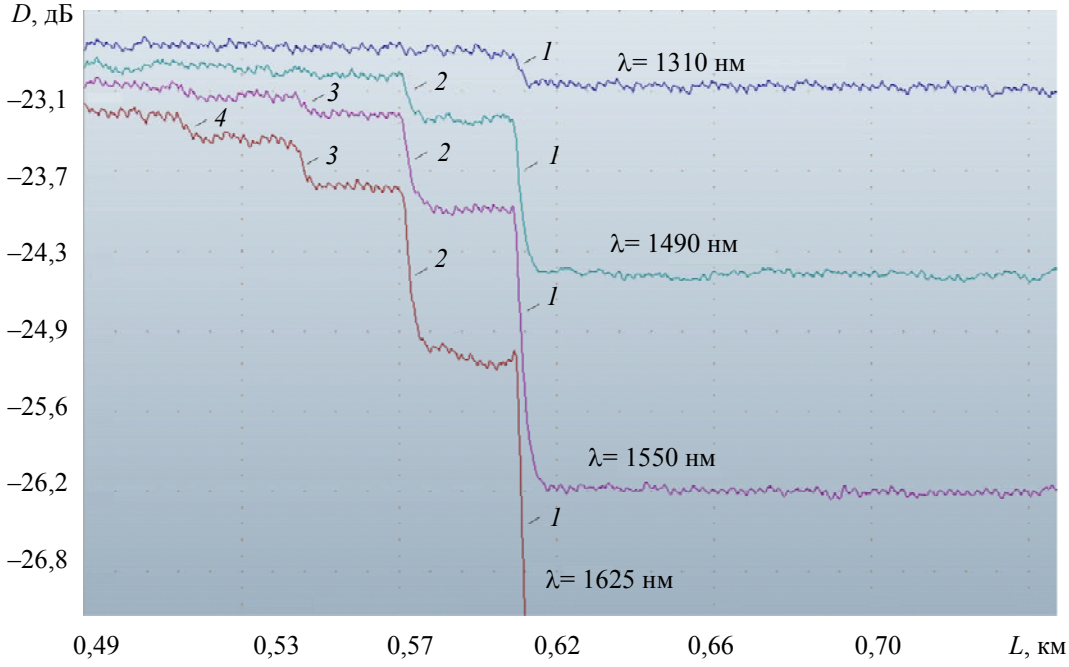


Рис. 4

Таким образом, при использовании макроизгибов *2*—*4* датчики на длине волны 1310 нм практические не ослабляют оптическое излучение.

Как было показано выше, передача данных по оптоволоконной линии может быть осуществлена, если создаваемое датчиками ослабление не превысит 20 дБ на длине волны передачи данных. Для определения количества датчиков *N*, которые могут быть использованы в системе мониторинга состояния объекта, необходимо учитывать также динамический диапазон рефлектометра, если последний будет использоваться в качестве регистрирующего устройства [13, 14].

Для наиболее точного определения положения датчиков на оптическом волокне при помощи рефлектометра FX300 длительность импульса зондирования выбиралась равной 3 нс; динамический диапазон рефлектометра 15 дБ.

В табл. 2 представлены значения ослабления мощности оптического излучения, вносимого макроизгибом оптического волокна и максимальное число датчиков, которое может содержать система мониторинга состояния объекта.

Отметим, что при размещении на оптическом волокне от 50 до 150 датчиков появлялось ослабление мощности оптического излучения на длине волны 1310 нм. Однако данное ослабление не превышало 3 дБ, поэтому передача информации на этой длине волны не прекращалась.

Таблица 2

Характеристики системы мониторинга состояния объекта

λ, нм	*R*, мм	*Q*, рад	*D*, дБ	*N*, шт
1490	8	π/2	0,30	50
1550	8	π/2	0,70	21
	10	3/5 π	0,10	150
1625	8	π/2	1,20	12
	10	3/5 π	0,25	60
	13	7/8 π	0,15	100

Заключение. Установлена возможность совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга состояния объекта. Для передачи информации предлагается использовать длину волны 1310 нм, а для системы мониторинга состояния объекта можно рекомендовать 1490, 1550 и 1625 нм.

Экспериментальным путем определены параметры макроизгибов оптического волокна, которые позволяют создавать датчики системы мониторинга состояния объекта, не вносящие существенного ослабления оптического излучения в линии связи при передаче данных на длине волны 1310 нм.

Для определенных параметров макроизгибов рассчитано количество датчиков, которые могут быть использованы в системе мониторинга состояния объекта при условии обеспечения возможности передачи данных посредством этого оптического волокна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agrawal G. P.* Fiber-Optic Communication Systems. NY: Wiley-Interscience, 2002.
2. *Дмитриев С. А., Слепов Н. Н.* Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М.: Техносфера, 2010. 607 с.
3. *Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В.* Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Тренз, 2002. 276 с.
4. *Убайдуллаев Р. Р.* Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Тренз, 2001. 267 с.
5. *Fidanboylu K., Efendioğlu H. S.* Fiber optic sensors and their applications // 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09). 13—15 May 2009, Karabuk, Turkey. P. 1—6.
6. *Udd E., Spillman W. B., jr.* Fiber Optic Sensors: an Introduction for Engineers and Scientists. NJ: John Wiley & Sons, 2011.
7. *Iniewski K., Rajan G.* Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2015.
8. *Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В.* Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРарт, 2003. 288 с.
9. *Василевский Г. В., Зеневич А. О., Лагутик А. А., Лукашик Т. М., Новиков Е. В., Жданович С. В.* Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна // Веснік сувязі. 2020. № 1(159). С. 56—59.
10. *Василевский Г. В., Зеневич А. О., Жданович С. В., Лукашик Т. М., Лагутик А. А.* Использование макроизгиба оптоволокна в качестве основы для создания датчика массы // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 930—937.
11. *Скляров О. К.* Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб: Лань, 2021. 268 с.
12. *Бейли Д., РайтЭ.* Волоконная оптика. Теория и практика. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2006. 320 с.

13. *Листвин А. В.* Рефлектометрия оптических волокон. М: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.

14. *Соллер Б. Дж., Гиффорд Д. К., Вольф М. С., Фроггатт М. Э.* Оптическая рефлектометриявысокого разрешения // Фотоника. 2019. Т. 13, № 5. С. 452—460.

Сведения об авторах

Андрей Олегович Зеневич — д-р. техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by

Сергей Вячеславович Жданович — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи; отраслевая лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; зав. лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by

Евгений Владимирович Новиков — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, Институт современных технологий связи; директор института; E-mail: e.novikov@bsac.by

Татьяна Александровна Матковская — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tandem7m@gmail.com

Татьяна Георгиевна Коваленко — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tgkov@yandex.by

Поступила в редакцию 05.02.22; одобрена после рецензирования 03.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*, NY, Wiley-Interscience, 2002.
2. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskayatekhnika: sovremennoyesostoyaniyeinovyyeperspektivy* (Fiber-Optic Technology: State of the Art and New Perspectives), Moscow, 2010, 607 p. (in Russ.)
3. Iorgachev D.V., Bondarenko O.V. *Volokonno-opticheskiye kabeli i linii svyazi* (Fiber Optic Cables and Communication Lines), Moscow, 2002, 276 p. (in Russ.)
4. Ubaidullaev R.R. *Volokonno-opticheskiyeseti* (Fiber Optic Networks), Moscow, 2001, 267 p. (in Russ.)
5. Fidanboylu K., Efendioğlu H.S. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, May 13–15, 2009, Karabuk, Turkey, pp. 1–6.
6. Udd E., Spillman W.B., jr. *Fiber Optic Sensors: an Introduction for Engineers and Scientists*, NJ, John Wiley & Sons, 2011.
7. Iniewski K., Rajan G. *Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications*, Boca Raton, CRC Press, 2015.
8. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskiye volokna dlya liniy svyazi* (Optical Fibers for Communication Lines), Moscow, 2003, 288 p. (in Russ.)
9. Vasileuski H.V., Zenevich A.O., Lagutik A.A., Lukashik T.M., Novikov E.V., Zhdanovich S.V. *Vesnik Svjazi*, 2020, no. 1(159), pp. 56–59. (in Russ.)
10. Vasileuski H.V., Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Lukashik T.M., Lagutik A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 10(63), pp. 930–937. (in Russ.)
11. Sklyarov O.K. *Volokonno-opticheskiye seti i sistemy svyazi* (Fiber Optic Networks and Communication Systems), St. Petersburg, 2021, 268 p. (in Russ.)
12. Bailey D., Wright E. *Practical Fiber Optics*, Perth, Australia, 2003.
13. Listvin A.V. *Reflektometriya opticheskikh volokon* (Reflectometry of Optical Fibers), Moscow, 2005, 208 p. (in Russ.)
14. Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E. *Photonics Russia*, 2019, no. 5(13), pp. 452–460. (in Russ.)

Data on authors

Andrey O. Zenevich — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector of the Academy; E-mail: a.zenevich@bsac.by

Sergey V. Zhdanovich — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications; Industry Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by

Evgeny V. Novikov — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Communication Technologies; Director of the Institute; E-mail: e.novikov@bsac.by

Tatiana A. Matkovskaia — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tandem7m@gmail.com

Tatiana G. Kovalenko — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tgkov@yandex.by

Received 05.02.22; approved after reviewing 03.03.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 677.616.41
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-413-419

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОКРАСОЧНОГО СЛОЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ ПРИБОРОМ

Е. Е. Майоров

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

Аннотация. Представлен колориметрический прибор, определяющий не только уровень соответствия цвета исследуемого образца и эталона, но и обеспечивающий измерение оптических спектров отражения в области длин волн λ = 380—760 нм. Прибор с помощью специального программного обеспечения рассчитывает на основе спектральных данных координаты цвета объекта в интересующей колориметрической системе. Исследованы металлические пластины, покрашенные в белый металлик, серебристый светло-серый, серебристо-зеленый, серебристо-красный, серебристо-черный цвета. Получены спектральные зависимости коэффициента диффузного отражения для каждого исследуемого образца.

Ключевые слова: *двулучевой полихроматор, колориметр, цвет, коэффициент диффузного отражения, интегрирующая сфера, диапазон длин волн*

Ссылка для цитирования: *Майоров Е. Е.* Измерение оптических параметров покрасочного слоя колориметрическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 413—419. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-413-419.

MEASURING THE PAINT LAYER OPTICAL PARAMETERS WITH A COLORIMETRIC INSTRUMENT

E. E. Maiorov

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

Abstract. A colorimetric device is presented that determines not only the level of color correspondence between the test sample and the standard, but also provides measurements of optical reflection spectra in the wavelength range λ = 380–760 nm. The device uses special software to calculate, based on spectral data, the color coordinates of the object in a specified colorimetric system. Metal plates painted in white metallic, silver-light gray, silver-green, silver-red, silver-black colors were studied. Spectral dependences of the diffuse reflection coefficient for each sample under study are obtained.

Keywords: double-beam polychromator, colorimeter, color, diffuse reflection coefficient, integrating sphere, wavelength range

For citation: Maiorov E. E. Measuring the paint layer optical parameters with a colorimetric instrument. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 413—419 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-413-419.

Введение. На сегодняшний день колориметрические приборы и системы пользуются огромным спросом в различных областях науки и техники, таких как химическая, биологическая, медицинская, экологическая и т.д. [1, 2]. Применение колориметра позволяет сравнивать цвета образца с эталоном, чтобы определить уровень их соответствия друг другу. Это может быть важно при подборе красок, например, при реставрационных работах на поврежденной части кузова автомобиля, чтобы отреставрированный фрагмент полностью совпадал не только по цвету, но и по оттенку [3, 4]. Таким образом, использование колориметра позволяет сэкономить на лакокрасочных материалах, избежав полного перекрашивания кузова автомобиля.

© *Майоров Е. Е., 2022*

Колориметры нашли свое применение в строительстве и дизайнерском искусстве. Использование колориметрических технологий для контроля соответствия разных материалов и аксессуаров оттенку одного цвета важно для строительства или обустройства интерьера [5, 6]. На производствах колориметры обеспечивают контроль продукции с тем, чтобы разные партии соответствовали одному оптическому параметру.

Отдельным направлением применения колориметров является определение концентрации веществ. При растворении в жидкости разных веществ цвет раствора изменяется [7, 8], поэтому можно анализировать раствор на предмет соответствия его необходимой концентрации. Это обусловливает применение колориметра в пищевой и химической промышленности.

Современные колориметрические приборы не только сравнивают цвета исследуемого образца с эталоном, определяют уровень их соответствия друг другу, но проводят измерения оптических спектров пропускания (T) или(и) отражения (R) в области длин волн $\lambda = 380—760$ нм, а также рассчитывают на основе спектральных данных координаты цвета объекта в интересующей колориметрической системе [9, 10]. Это стало возможным благодаря включению в состав колориметра спектрофотометрического датчика. Более того, эти приборы, как правило, используют интегрирующую фотометрическую сферу, где излучатель и фотодетектор расположены за ее пределами [11, 12].

Целью настоящей работы явилось измерение оптических параметров образцов автомобильных красок разработанным колориметрическим прибором, использующим двуполостную интегрирующую сферу без экрана с двулучевым полихроматором.

Объект и метод исследования. Объектом исследования служили окрашенные металлические пластины популярных цветов автомобилей: белый металлик, серебристый светло-серый, серебристо-зеленый, серебристо-красный, серебристо-черный. В основном краски этих цветов выпускают фирмы Mobihel и Duxone. Образцы предоставлены одним из автосервисов Санкт-Петербурга, занимающимся покраской кузовов легковых автомобилей.

Спектры диффузного отражения измерялись на разработанном колориметре. Внешний вид прибора представлен на рис. 1.

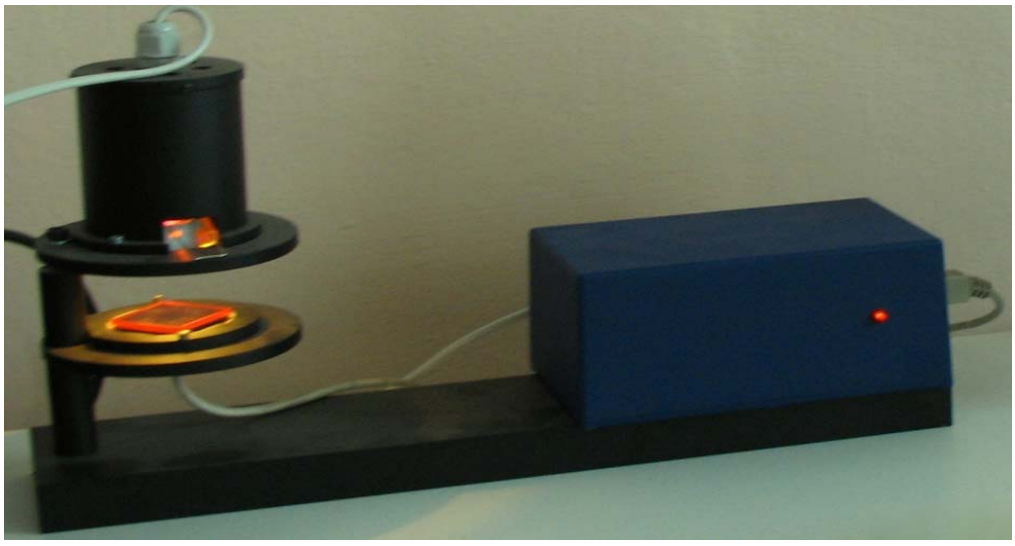


Рис. 1

В конструкции прибора использовалась схематически изображенная на рис. 2 двуполостная интегрирующая сфера, у которой отсутствует экран.

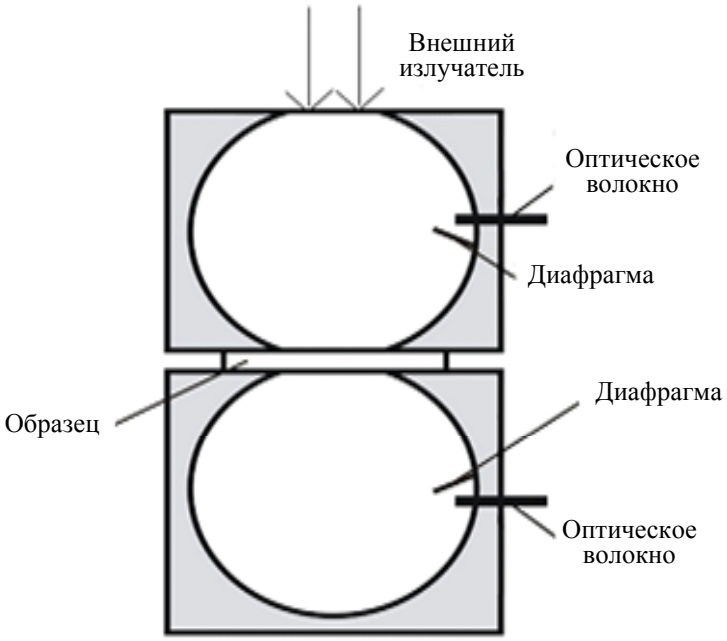


Рис. 2

Диаметр каждой полости 70 мм, диаметр входного и выходного портов 8 мм, коэффициент отражения внутренней поверхности сфер $R = 0{,}9$. В качестве источника излучения использовалась малогабаритная галогенная лампа накаливания (мощность 20 Вт, напряжение питания 12 В).

Такое конструктивное решение интегрирующей сферы представляет особый интерес, так как позволяет одновременно получить данные по диффузному отражению и пропусканию исследуемого объекта. В данной конфигурации использован внешний осветитель. Коллекторы на основе оптического волокна передают отраженное излучение в электронную систему сбора и обработки данных. Оба коллектора расположены горизонтально и закрыты диафрагмами. Для измерения спектров отражения $R(\lambda)$ исследуемых объектов посредством двуполостных интегрирующих сфер образец установлен между обеими интегрирующими сферами. При необходимости каналы отражения и пропускания могут быть разделены и использоваться независимо.

Распределение освещенности внутри двуполостной интегрирующей сферы, а также на поверхности образца рассчитывалось матричным методом [13, 14]. На внутренней поверхности сферы и образца выделялись кольцевые зоны. Направление излучения на соответствующие элементы зон (верхнюю и нижнюю поверхности образца, верхнюю и нижнюю части первой и второй сфер, верхнюю и нижнюю поверхности экрана) определяется конфигурационными особенностями сферы. Если обмена излучением между зонами нет, то сигнал АЦП отсутствует.

В состав прибора входят галогенная лампа накаливания, двулучевой спектрофотометр на основе полихроматора с оптоволоконными коллекторами для передачи отраженного излучения от поверхности исследуемого объекта. Спектрофотометр работал в диапазоне длин волн от 380 до 760 нм. В полихроматоре применялись вогнутые голографические дифракционные решетки, имеющие 600 штрихов на 1 мм и радиус кривизны $r = 12{,}5$ мм. Особенность полихроматора заключалась в установке дифракционных решеток, при которой они были смещены с круга Роуланда. Также использовалась одна ПЗС-линейка SONY ILX 511 на оба канала измерений. Внешний вид двулучевого полихроматора с электронным блоком и его структурная схема приведены на рис. 3.

Рис. 3

На рис. 4 приведена последовательность определения коэффициента отражения, которая более подробно рассмотрена в [15]:

— измерение уровня „0“ отражения $R(0, 0, 0, 0)$;

— измерение уровня „100 %“ отражения $R(r_{std}, r_{std}, 0, 0)$ (r_{std} — коэффициент отражения эталона — молочно-матового стекла МС-20);

— измерение коэффициента отражения $R(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s)$.

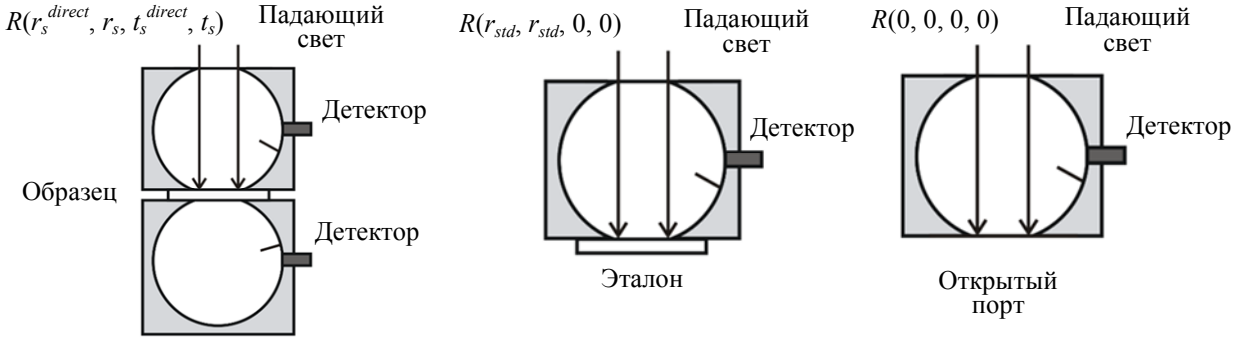


Рис. 4

Результирующий коэффициент отражения определялся по формуле:

$$R = r_{std} \cdot \frac{R(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s) - R(0,0,0,0)}{R(r_{std}, r_{std}, 0, 0) - R(0,0,0,0)}.$$

Оптические характеристики (коэффициент отражения) определялись с помощью специализированной программы IAD (Inverse adding-doubling).

Экспериментальные результаты. Представленный колориметр с двуполостной интегрирующей сферой и спектрофотометрическим датчиком был использован при исследовании металлических пластин, покрашенных в белый металлик, серебристый светло-серый, серебристо-зеленый, серебристо-красный, серебристо-черный цвета. Образцы имели прямоугольную форму 1×1 см, высота вариации красочного рельефа 1 мм.

Спектральные зависимости R разных цветов представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что спектры отражения пластины цвета белый металлик (кривая *1*) в длинноволновой области λ = 500—780 нм имеют наибольшее отражение. Но в коротковолновой области спектра λ = 380—420 нм наблюдается падение R. У пластины серебристого светло-серого цвета (*2*) кривая спектральной зависимости $R(\lambda)$ расположена ниже и имеет максимум в диапазоне λ = 620—780 нм. Минимальное значение R зафиксировано в диапазоне λ = 380—400 нм. Далее пластина серебристо-зеленого цвета (*3*): кривая имела сложную форму распределения и на λ = 630—780 нм наблюдались всплески, где R = 35 %. Что касается пластины серебристо-красного цвета (*4*), то, как и у пластины светло-серого цвета, максимальное значение R за-

фиксировано в диапазоне λ = 620—780 нм. Пластина серебристо-черного цвета (*5*) имела самую низкую отражающую способность, и ее кривая распределения располагалась ниже, чем у всех предыдущих образцов.

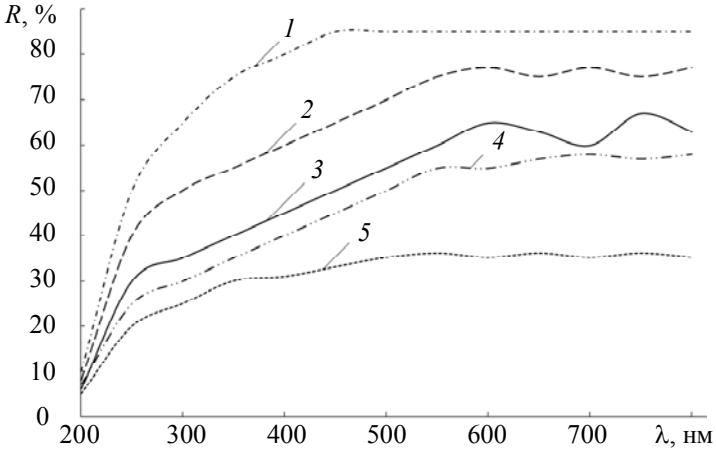


Рис. 5

По форме спектральные кривые отражения похожи, существенных сдвигов не наблюдалось.

Заключение. В работе проведены измерения нескольких образцов краски Mobihel и Duxone разработанным колориметрическим прибором. Получены спектральные зависимости исследуемых образцов. Определено, что у пластины цвета белый металлик коэффициент диффузного отражения самый высокий, а у пластины серебристо-черный цвета самый низкий. В целом полученные результаты удовлетворяют требованиям практического использования. Полученные экспериментальные результаты представляют интерес для автомобилестроения и оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юстова Е. Н.* Цветовые измерения (Колориметрия). СПб: Изд-во СПбГУ, 2000. 397 с.

2. *Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Хохлова М. В., Курлов А. В., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Фадеев А. О.* Возможность использования колориметра с RGB-компонентами для исследований фотооптического отбеливания, тонирования и окрашивания бумаги // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 3. С. 22—29.

3. *Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Абрамян В. К., Зайцев Ю. Е., Хайдаров А. Г., Хайдаров Г. Г.* Разработка колориметрического датчика с RGB-элементом и двуполостной оптоэлектронной интегрирующей сферой для контроля диффузно отражающих объектов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2017. Вып. 48, № 20 (269). С. 107—115.

4. *Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Хайдаров А. Г., Абрамян В. К., Зайцев Ю. Е.* Разработка лабораторного спектрофотометра видимой области спектра для контроля жидкофазных сред // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 8. С. 42—46.

5. *Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Туровская М. С., Литвиненко А. Н., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Пушкина В. П., Пономарев С. Е.* Применение разработанного колориметрического прибора для измерения геометрических параметров цвета стоматологических отбеливателей и его технико-экономическое обоснование // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 1. С. 54—59.

6. *Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Попова Н. Э., Черняк Т. А., Курлов А. В., Дагаев А. В., Цыганкова Г. А.* Исследование *in vivo* зубной эмали человека колориметрическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 373—379. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-373-379.

7. *Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Дагаев А. В., Ушакова А. С., Гулиев Р. Б., Хохлова М. В., Цыганкова Г. А., Писарева Е. А.* Исследование спектров диффузного отражения образцов белой бумаги автоматизированным RGB колориметром // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 12. С. 14—22. DOI: 10.25791/pribor.12.2019.1062.

8. *Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Нарушак Н. С., Шаламай Л. И.* Спектроскопия отражения тканей зубов *in vitro* и наногибридных реставрационных материалов // MEDICUS. Международный медицинский научный журнал. 2020. № 5 (35). С. 68—73.

9. *Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С.* Использование метода спектроскопии отражения для распознавания подлинности стоматологических реставрационных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 63—70. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70.

10. *Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Хохлова М. В.* Экспериментальное исследование разработанного колориметрического датчика для измерения цветности стекла // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 1(345). С. 131—137. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-345-1-131-137.

11. *Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С.* Спектральные методы и средства исследований оптических свойств стоматологического материала на основе метилметакрилатных смол // Медицинская техника. 2021. № 6. С. 24—27.

12. *Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А.* Фотометрия автомобильных моторных масел // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 83—88. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-83-88.

13. *Tardy H. L.* Matrix method for integrating-sphere calculations // Optical Society of America. 1991. Vol. 8, N 9. P. 1411—1418.

14. *Clare J. F.* Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres // Optical Society of America. 1998. Vol. 15, N 12. P. 3086—3096.

15. *Pickering J. W., Prahl S. A., Wieringen N. van, Beek J. F., Sterenborg H. J. C. M., Gemert M. J. C. van*. A Double integrating sphere system for measuring the optical properties of tissue // Applied Optics. 1993. Vol. 32. P. 399—410.

Сведения об авторе

Евгений Евгеньевич Майоров — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.22; одобрена после рецензирования 21.02.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Yustova E.N. *Tsvetovyye izmereniya (Kolorimetriya)* (Color Measurements (Colorimetry)), St. Petersburg, 2000, 397 p. (in Russ.)
2. Mayorov E.E., Chernyak T.A., Dagaev A.V., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khokhlova M.V., Kurlov A.V., Fadeev A.O. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2017, no. 3, pp. 22–29. (in Russ.)
3. Mayorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Abrahamyan V.K., Zaitsev Y.E., Khaidarov A.G., Khaidarov G.G. *Belgorod State University Scientific Bulletin Applied Mathematics & Physics*, 2017, no. 20(48), pp. 107–115. (in Russ.)
4. Mayorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khaidarov G.G., Khaidarov A.G., Zaitsev Y.E., Abrahamyan V.K. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2016, no. 8, pp. 42–46. (in Russ.)
5. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Turovskaya M.S., Litvinenko A.N., Chernyak T.A., Pushkina V.P., Dagaev A.V., Ponomarev S.E. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 1, pp. 54–59. (in Russ.)
6. Prokopenko V.T., Majorov E.E., Shalamay L.I., Popova N.E., Chernyak T.A., Kurlov A.V., Dagaev A.V., Tsygankova G.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 4(62), pp. 373–379, DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-373-379. (in Russ.)
7. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Dagaev A.V., Ushakova A.S., Guliev R.B., Khokhlova M.V., Tsygankova G.A., Pisareva Y.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2019, no. 12, pp. 14–22, DOI: 10.25791/pribor.12.2019.1062. (in Russ.)
8. Kuzmina D.A., Mendosa E.Yu., Maiorov E.E., Narushak N.S., Shalamay L.I. *MEDICUS*, 2020, no. 5(35), pp. 68–73. (in Russ.)
9. Kuzmina D.A., Maiorov E.E., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Narushak N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 1(64), pp. 63–70, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70. (in Russ.)
10. Arefyev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Pisareva E.A., Khokhlova M.V. Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, 2021, no. 1(345), pp. 131–137, DOI: 10.33979/2073-7408-2021-345-1-131-137. (in Russ.)
11. Mayorov E.E., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Biomedical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 24–27. (in Russ.)
12. Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Maiorov E.E., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. *News of*

Tula State University. Technical Science, 2021, no. 6, pp. 83–88, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-83-88 (in Russ.)
13. Tardy H.L. *Optical Society of America*, 1991, no. 9(8), pp. 1411–1418.
14. Clare J.F. *Optical Society of America*, 1998, no. 12(15), pp. 3086–3096.
15. Pickering J.W., Prahl S.A., Wieringen N. van, Beek J.F., Sterenborg H.J.C.M., Gemert M.J.C. van, *Applied Optics*, 1993, vol. 32, pp. 399–410.

Data on author

Evgeny E. Maiorov — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru

Received 15.02.22; approved after reviewing 21.02.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 681.5.620.193
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-420-429

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ КОМПОЗИТНОЙ НАМОТКИ

А. Ю. Кутьин[*1], В. М. Мусалимов[2], М. С. Малов[2]

[1] *СК „Медэкспресс“, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[*] *kutin_alex@mail.ru*

Аннотация. Несмотря на достаточно давнюю и успешную практику автоматизации методов изготовления полых композитных изделий, необходимо создать систему управления процессом филаментной намотки. Система управления должна учитывать взаимосвязь между геометрическими параметрами создаваемой намотки и параметрами ее напряженного состояния. С целью корректного учета свойств объекта управления разработана модель динамики процессов этого метода при условии изменения массы объекта управления и момента его инерции. Полученные уравнения являются основой для создания системы управления, где в качестве управляющего параметра используются угловая скорость оправки и величина приращения радиуса намотки.

Ключевые слова: *композиционный материал, намотка, натяжение нити, система управления процессом намотки, уравнения Лагранжа 2-го рода*

Ссылка для цитирования: *Кутьин А. Ю., Мусалимов В. М., Малов М. С.* Моделирование динамических процессов в системе управления плотностью композитной намотки // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 420—429. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-420-429.

MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN THE COMPOSITE WINDING DENSITY CONTROL SYSTEM

A. Yu. Kutin[*1], V. M. Musalimov[2], M. S. Malov[2]

[1] *Medexpress Insurance JSC, St. Petersburg, Russia*
[2] *ITMO University, St. Petersburg, Russia*
[*] *kutin_alex@mail.ru*

Abstract. Despite the fairly long and successful practice of automating the methods of manufacturing hollow composite products, it is necessary to create a control system for the process of filament winding. The control system must take into account the relationship between the geometric parameters of the winding being created and the parameters of its strained state. In order to correctly account for the properties of the control object, a model of the dynamics of the processes of this method has been developed, subject to changes in the mass of the control object and its moment of inertia. The obtained equations are the basis for creating a control system, where the angular velocity of the mandrel and the increment of the winding radius are used as the control parameter.

Keywords: composite materials, winding, thread tension, winding process control system, Lagrange equations of the 2nd kind

For citation: Kutin A. Yu., Musalimov V. M., Malov M. S. Modeling of dynamic processes in the composite winding density control system. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 420—429 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-420-429.

© Кутьин А. Ю., Мусалимов В. М., Малов М. С., 2022

Введение. Одним из наиболее широко используемых методов изготовления полых композитных изделий является филаментная намотка. Этим методом изготавливают и трубы, и специализированные емкости различного назначения. Несмотря на успешную практику автоматизации этого процесса необходимо создать систему управления, учитывающую взаимосвязь геометрических параметров создаваемой намотки и параметров ее напряженного состояния. Для решения поставленной задачи нами предложено устройство управления процессом формирования намотки [1]. Как и в любом устройстве такого типа, адгезия слоев намотки обеспечивается либо пропиткой волокон клеящим составом в специальной ванне, либо использованием препрегов. Толщина намотки может варьировать от 5 до 300 мм и более — в зависимости от предназначения композитного изделия. Натяжение наматываемого материала регулируется специальным механизмом компенсационного типа.

Динамика процессов системы управления. Динамика процессов описывается совокупностью дифференциальных уравнений [2]. При этом следует учесть изменение массы объекта управления (оправка с намоткой) и соответственно момента его инерции, а также взаимодействие с намоткой укатывающего валика (рис. 1; *1* — ротор электродвигателя, *2* — оправка, *3* — намотка, *4* — укатывающий валик, *5* — паковка с наматываемым материалом, ρ — радиус намотки, f_n — натяжение подаваемого материала, ρ_b — радиус укатывающего валика, Q_n — сила, прикладываемая к укатывающему валику для обеспечения его поступательного движения). Чтобы получить такие дифференциальные уравнения, воспользуемся известным приемом обобщенного описания динамики системы управления уравнениями Лагранжа 2-го рода [2]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_p}\right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_p} = Q_\theta, \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_b}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_b} = Q_x, \tag{2}$$

где t — текущее время динамического процесса; T — кинетическая энергия системы; θ_p и x_b — обобщенные координаты, соответственно угол поворота ротора электродвигателя и линейное перемещение укатывающего валика; Q_θ и Q_x — обобщенные силы.

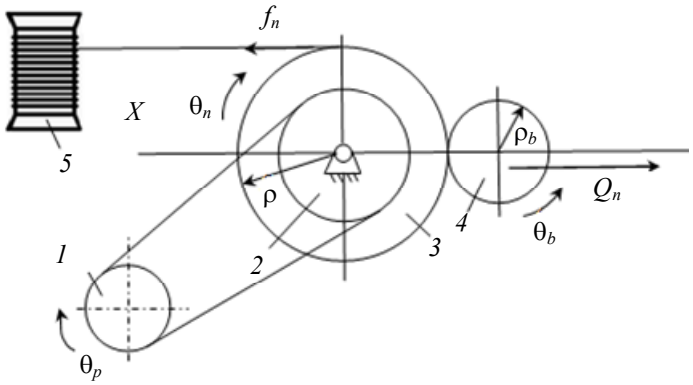


Рис. 1

Кинетическая энергия T определяется следующей суммой:

$$T = T_1 + T_2 + T_3. \tag{3}$$

Слагаемые T_1 и T_2 определяются по известной формуле кинетической энергии [3] для тела, вращающегося вокруг неподвижной оси:

$$T_1 = \frac{\mathrm{J}_p \dot{\theta}_p^{\,2}}{2}, \quad T_2 = \frac{\mathrm{J}_n \dot{\theta}_n^{\,2}}{2}, \tag{4}$$

где J_p и J_n — моменты инерции ротора электродвигателя и оправки, $\dot{\theta}_p$ и $\dot{\theta}_n$ — угловая скорость ротора электродвигателя и оправки. Для определения третьего слагаемого примем во внимание вращательное и поступательное движение укатывающего валика:

$$T_3 = \frac{\mathrm{J}_b \dot{\theta}_b^{\,2}}{2} + \frac{m_b V_x^{\,2}}{2}, \tag{5}$$

где J_b и $\dot{\theta}_b$ — момент инерции и угловая скорость укатывающего валика, m_b — его масса, V_x — скорость поступательного движения укатывающего валика ($V_x = \dot{x}_b$).

Чтобы определить обобщенную силу Q_θ, воспользуемся известным соотношением [4] между суммой возможных элементарных работ и суммой произведений обобщенных сил и вариаций обобщенных координат:

$$\delta A_\theta + \delta A_x = Q_\theta \delta\theta_p + Q_x \delta x_b, \tag{6}$$

где δA_θ и δA_x — элементарная работа при возможных перемещениях.

Обобщенные координаты не зависят друг от друга [4], поэтому придадим системе возможный бесконечно малый поворот $\delta\theta_p$, при котором изменится только одна координата θ_p, а x_b останется неизменной ($\delta x_b = 0$). При таком повороте из (6) следует

$$Q_\theta = \delta A_\theta / \delta\theta_p. \tag{7}$$

Элементарная работа δA_θ при возможном повороте $\delta\theta_p$ составит:

$$\delta A_\theta = M_d \delta\theta_p - M_c \delta\theta_n - M_b \delta\theta_b - f_n \rho \delta\theta_n - R_o k_t \delta\theta_n, \tag{8}$$

где M_d — вращающий момент электродвигателя, M_c — момент сопротивления вращению оправки, M_b — момент сопротивления вращению укатывающего валика, R_o — реакция намотки на воздействие укатывающего валика, k_t — коэффициент трения качения укатывающего валика по оправке с намоткой, $\delta\theta_n$ — возможный поворот оправки:

$$\delta\theta_n = \frac{\rho_p}{\rho_n} \delta\theta_p, \tag{9}$$

ρ_p — радиус шкива, установленного на электродвигателе, ρ_n — радиус шкива, установленного на оправке, $\delta\theta_b$ — возможный поворот укатывающего валика

$$\delta\theta_b = \frac{\rho}{\rho_b} \delta\theta_n = \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} \delta\theta_p. \tag{10}$$

Из (6) с учетом (8) найдем правую часть выражения (1):

$$Q_\theta = M_d - \frac{\rho_p}{\rho_n} M_c - \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} M_b - \frac{\rho_p}{\rho_n} f_n \rho - \frac{\rho_p}{\rho_n} R_o k_t, \tag{11}$$

второе слагаемое в левой части выражения $\partial T / \partial\theta_p$ равно нулю, поскольку кинетическая энергия системы зависит от угловой скорости ротора электродвигателя (4), (5), но не собственно от угла поворота. Чтобы найти первое слагаемое левой части рассматриваемого уравнения, определим частную производную функции кинетической энергии T по переменной $\dot{\theta}_p$:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_p} = \left[\mathrm{J}_p + \mathrm{J}_n \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 + \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 \right] \dot{\theta}_p . \qquad (12)$$

Для угловой скорости ротора электродвигателя $\omega_\rho = \dot{\theta}_p$ найдем производную по времени от функции (12), определив тем самым первое слагаемое левой части уравнения (1):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_p} \right) = \left[\mathrm{J}_p + \mathrm{J}_n \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 + \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 \right] \frac{d\omega_p}{dt} + \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 \frac{d\mathrm{J}_n}{dt} + \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho_p}{\rho_n \rho_b} \right)^2 2\rho \frac{d\rho}{dt} \right] \omega_p . \qquad (13)$$

Согласно (11) и (13), получим первое дифференциальное уравнение взаимодействия объекта управления и органа управления:

$$\left[\mathrm{J}_p + \mathrm{J}_n \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 + \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 \right] \frac{d\omega_p}{dt} + \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 \frac{d\mathrm{J}_n}{dt} + \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho_p}{\rho_n \rho_b} \right)^2 2\rho \frac{d\rho}{dt} \right] \omega_p =$$

$$= M_d - \frac{\rho_p}{\rho_n} M_c - \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} M_b - \frac{\rho_p}{\rho_n} f_n \rho - \frac{\rho_p}{\rho_n} R_o k_t . \qquad (14)$$

Сумму моментов инерции в этом уравнении обозначим через

$$\mathrm{J}_u = \mathrm{J}_p + \mathrm{J}_n \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 + \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 . \qquad (15)$$

Кроме того, допустим, что моменты сопротивления вращению в опорах оправки и укатывающего валика M_c и M_b пропорциональны их угловым скоростям [5]:

$$M_c = h_n \dot{\theta}_n , \quad M_b = h_b \dot{\theta}_b \qquad (16)$$

или, с учетом (9), (10):

$$M_c = h_n \frac{\rho_p}{\rho_n} \omega_\rho , \quad M_b = h_b \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} \omega_\rho , \qquad (17)$$

где h_n и h_b — коэффициенты пропорциональности.

В результате уравнение (14) преобразуется к следующему виду:

$$\mathrm{J}_u \frac{d\omega_p}{dt} + \xi_o \omega_p = M_d - \frac{\rho_p}{\rho_n} f_n \rho - \frac{\rho_p}{\rho_n} R_o k_t , \qquad (18)$$

где

$$\xi_o = \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right)^2 \frac{d\mathrm{J}_n}{dt} + \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho_p}{\rho_n \rho_b} \right)^2 2\rho \frac{d\rho}{dt} + h_n \frac{\rho_p}{\rho_n} + h_b \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} . \qquad (19)$$

Коэффициент k_t определяется отношением моментов импульсов вращения укатывающего валика и оправки [6]:

$$k_t = \frac{D_b}{D_n} = \frac{\mathrm{J}_n \frac{\rho_p}{\rho_n} \omega_p}{\mathrm{J}_b \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\rho_p}{\rho_n} \omega_p} = \frac{\mathrm{J}_n \rho_b}{\mathrm{J}_b \rho} , \qquad (20)$$

где D_b — момент импульса вращения укатывающего валика, D_n — момент импульса вращения оправки.

По мере увеличения радиуса намотки ρ момент инерции J_n оправки с намоткой и суммарный момент инерции J_u изменяются. Чтобы установить закономерность изменения J_n, представим зависимость радиуса намотки как функцию, где в качестве аргумента используется текущее время намотки композитного изделия. В соответствии с предложенной моделью формирования намотки [1] ее текущий радиус рассчитывается на основе выражения:

$$\rho - \rho_0 = \int_0^{\theta_n} a d\theta_n , \tag{21}$$

$$a = \frac{v}{\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho} = \frac{d\rho}{d\theta_n} = \frac{d\rho}{\frac{\rho_p}{\rho_n} d\theta_\rho} , \tag{22}$$

υ — скорость перемещения точки наматывания (точки контакта наматываемого материала с телом намотки) в радиальном направлении ($\upsilon = d\rho/dt$), $\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho$ — угловая скорость ω_n вращения оправки ($\omega_n = \frac{\rho_p\, d\theta_\rho}{\rho_n\, dt}$).

При небольшой толщине намотки, когда $a \approx \text{const}$, выражение (21) может быть представлено спиралью Архимеда:

$$\rho - \rho_0 = a\,\theta_n = a\frac{\rho_p}{\rho_n}\theta_\rho(t), \tag{23}$$

где $\theta_\rho(t) = \int_0^t \omega_\rho dt$, при $\omega_\rho = \text{const}$

$$\rho - \rho_0 = a\,\theta_n = a\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho t . \tag{24}$$

Момент инерции J_n оправки с намоткой, определяющий k_t, представим в виде суммы моментов:

$$J_n = J_e + J_w , \tag{25}$$

где J_e — момент инерции собственно оправки, когда $\rho = \rho_0$, J_w — момент инерции намотки.

Момент инерции J_w рассчитывается как момент инерции полого цилиндра:

$$J_w = \frac{1}{2} m_н \left[\rho^2(t) + \rho_0^2\right], \tag{26}$$

где $m_н$ — масса намотки.

Представив $m_н$ в виде произведения плотности намотки $y_н$ на ее объем

$$m_н = y_н \pi H\left(\rho^2 - \rho_0^2\right), \tag{27}$$

где H — ширина оправки, для J_w из (25) запишем:

$$J_w . = \frac{1}{2} y_н \pi H\left(\rho^4 - \rho_0^4\right). \tag{28}$$

Для дальнейшего решения дифференциального уравнения (18), описывающего изменение состояния объекта управления при изменении угла поворота ротора электродвигателя θ_p, необходимо определить множитель ξ_o из (19). Найдем производные, входящие в выражение (19), используя выражение (24):

$$\frac{d\rho}{dt} = a\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho, \tag{29}$$

$$\frac{dJ_n}{dt} = \frac{dJ_w}{dt} = 2y_н\pi Ha\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho\left(a\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho t + \rho_0\right)^3. \tag{30}$$

После проведенных уточнений следует вернуться к анализу уравнения (18), отражающего динамические процессы, возникающие при вращении ротора электродвигателя и объекта управления. В неустановившемся режиме движения (при разгоне или торможении) вращающий момент электродвигателя M_d состоит из момента статического сопротивления M_{ct}, соответствующего установившемуся режиму, и динамического (избыточного) момента M_{uz}, обусловленного инерцией неравномерно движущихся масс [7]. При разгоне или торможении угловое ускорение принимают постоянным [7]: в этом случае, при равноускоренном или равнозамедленном вращательном движении, избыточный момент подчиняется известной зависимости

$$M_{uz} = J_u\frac{d\omega_p}{dt} = J_u\frac{\omega_p}{t_{rz}}, \tag{31}$$

где t_{rz} — время разгона.

После разгона ($t > t_{rz}$) процесс стабилизируется, когда $M_{uz} = 0$, $M_d = M_{ct}$ и (ω_ρ = const). В этом случае, разделив правую и левую части уравнения (18) на ξ_o, получим

$$\omega_p = q_1M_d - q_2f_n - q_3R_o, \tag{32}$$

где $q_1 = 1/\xi_o$, $q_2 = \frac{\rho\rho_p}{\xi_o\rho_n}$, $q_3 = \frac{k_t\rho_p}{\xi_o\rho_n}$ — коэффициенты передачи.

Учитывая (29) и (30), из (19) получим функциональную зависимость множителя $\xi_o(t)$:

$$\xi_o(t) = \left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^3\left[2y_н\pi Ha\,\omega_\rho\left(a\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho t + \rho_0\right)^3\right] +$$

$$+ J_b\left(\frac{\rho_p}{\rho_n\rho_b}\right)^2 2\left(a\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho t + \rho_0\right)\left(a\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho\right) + h_n\frac{\rho_p}{\rho_n} + h_b\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}. \tag{33}$$

Изменение состояния объекта управления с течением времени в данном случае характеризуется изменением коэффициентов передачи (рис. 2).

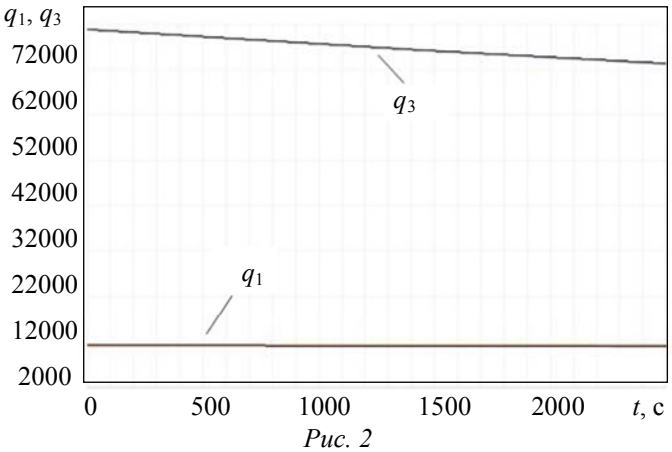


Рис. 2

Рассматривая полученные зависимости, следует отметить, что за время наматывания коэффициенты передачи меняются незначительно. В данном случае моделью рассматриваемого

объекта управления является апериодическое звено первого порядка (18). Максимальная длительность переходных процессов для таких звеньев не превышает четырехкратного значения постоянной времени [8]: в частности, в (18) — J_u / ξ_o. Относительные изменения постоянной времени и коэффициентов передачи за время переходного процесса не превышают 2 %. Как известно [8], объект управления можно считать квазистационарным, если за время переходного процесса изменения коэффициентов дифференциального уравнения незначительны.

Процесс управления поступательным движением укатывающего валика. Проанализируем поступательное движение укатывающего валика в случае генерации соответствующего импульса от блока управления. Получим дифференциальное уравнение для определения параметрической передаточной функции объекта, связывающей линейное перемещение x_b укатывающего валика с усилием Q_x. Из (2) и (5) имеем

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_b} = m_b \dot{x}_b \ , \qquad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_b}\right) = m_b \ddot{x}_b \, . \tag{34}$$

При возможном перемещении δx_b:

$$\delta A_x = Q_n \delta x_b - f_c \delta x_b - \Psi_n \delta x_b \, , \tag{35}$$

где Q_n — сила, прикладываемая к укатывающему валику для обеспечения его поступательного движения; f_c — сила сопротивления движению укатывающего валика вдоль оси X (рис. 1); Ψ_n — сила прижима укатывающего валика к намотанным на оправку нитям.

В (35) допускаем, что сила прижима Ψ_n компенсируется силой упругости намотки (ее пропорциональной составляющей, описываемой законом Гука), кроме того, предполагаем, что сила сопротивления f_c пропорциональна скорости линейного перемещения $\dot{x}_b$ ($f_c = p_v \dot{x}_b$, p_v — коэффициент пропорциональности), тогда

$$\delta A_x = Q_n \delta x_b - f_c \delta x_b - k_n x_b \delta x_b \, , \tag{36}$$

где k_n — коэффициент жесткости намотки.

В результате из (2) с учетом (34) и (36) имеем:

$$m_b \ddot{x}_b + p_v \dot{x}_b + k_n x_b = Q_n \, . \tag{37}$$

Приведем уравнение (37) к виду

$$\frac{m_b}{k_n} \ddot{x}_b + \frac{p_v}{k_n} \dot{x}_b + x_b = \frac{1}{k_n} Q_n \, . \tag{38}$$

Из (38) определим передаточную функцию объекта

$$W_b(p) = \frac{x_b(p)}{Q_n(p)} = \frac{1}{k_n\left(\frac{m_b}{k_n} p^2 + \frac{p_v}{k_n} p + 1\right)} = \frac{\eta}{\left(\tau^2 p^2 + 2d\tau p + 1\right)} \, , \tag{39}$$

где τ — постоянная времени управляющего звена ($\tau = \sqrt{\frac{m_b}{k_n}}$); $\eta = \frac{1}{k_n}$, d — коэффициент демпфирования ($d = \frac{p_v}{2\sqrt{m_b \ k_n}}$).

Передаточную функцию всего звена управления, включающего в себя импульсный блок, генерирующий командные импульсы для механизма отвода укатывающего валика, можно определить следующим выражением [9]:

$$W_p(z) = Z\left\{W_{\text{пнч}}(p)\right\} \, , \tag{40}$$

где $Z\{\}$ — символ z-преобразования, $W_{\text{пнч}}(p)$ — передаточная функция приведенной непрерывной части:

$$W_{\text{пнч}}(p) = W_{fe}(p)\, W_b(p), \tag{41}$$

где $W_{fe}(p)$ — передаточная функция импульсного блока.

Импульсный блок формирует прямоугольные импульсы длительностью $\tau_{\text{н}}$ с периодом следования S_v. Его передаточная функция описывается выражением [9]:

$$W_{fe}(p) = \frac{k_{ue}\left(1 - e^{-\tau_{\text{н}} p}\right)}{p}, \tag{42}$$

где k_{ue} — коэффициент передачи импульсного блока.

С помощью (40) определяется переходная функция управляющего звена, характеризующая его динамические свойства и отображающая реакцию звена на единичное ступенчатое воздействие, до приложения которого звено находилось в покое. Для получения указанной функции дискретная передаточная функция $W_p(z)$ экстраполируется непрерывной передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{\Phi_p(p)}{Q_p(p)}. \tag{43}$$

Переходная функция управляющего звена $\Phi_{p1}(p)$ в операторном виде определяется так:

$$\Phi_{p1}(p) = \frac{1}{p} W_p(p). \tag{44}$$

Переходные функции управляющего звена при $k_n = 6{,}78 \cdot 10^{10}$ Н/м, $m_b = 0{,}38$ кг представлены на рис. 3 (кривая *1* — $p_v = 0{,}03$, *2* — 0,12, *3* — 0,96 Нс/м). Полученные результаты позволяют определить управляющее звено как колебательное второго порядка. Его настройка, без серьезных конструктивных изменений, осуществляется путем изменения коэффициента демпфирования [10, 11]. В частности, при возрастании указанного коэффициента, за счет увеличения коэффициента пропорциональности p_v, снижается амплитуда колебаний переходной функции при затухании (см. рис. 3).

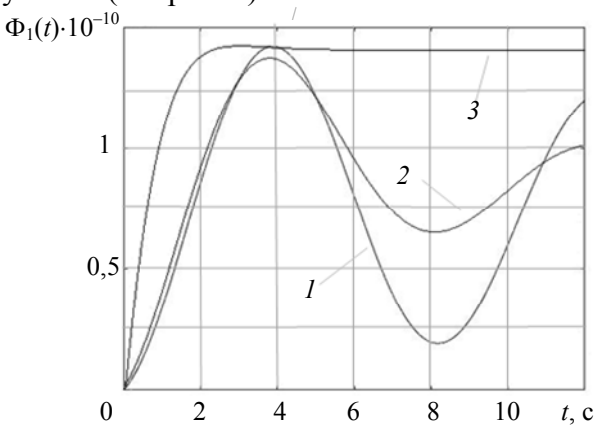


Рис. 3

Заключение. Полученные уравнения являются основой для создания системы управления, где в качестве управляющего параметра используются угловая скорость оправки и величина приращения радиуса намотки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kutin A., Musalimov V.* Winding density regulation in the composite shell manufacture // Proc. of the 2019 IEEE Intern. Conf. on Mechatronics, ICM 2019. 2019. P. 332—336.
2. *Рябов В. Г., Азметов Х. Х., Макаров Д. А.* Элементы аналитической механики. Уравнения Лагранжа II рода и примеры решения задач. М.: Московский государственный технический университет „МАМИ“, 2011. 76 с.
3. *Раус Э.* Динамика системы твердых тел / Под ред. *Ю. А. Архангельского и В. Г. Демина*. М.: Наука, 1983. Т. 1. 464 с.
4. *Мусалимов В. М., Сергушин П. А.* Аналитическая механика. Уравнение Лагранжа второго рода. Свободные колебания. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 53 с.
5. *Овчинников В. В.* Прикладная механика: учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. 308 с.
6. *Суслов Г. К.* Теоретическая механика. М.: Гостехиздат, 1971. 236 с.
7. *Эльяш Н. Н.* Динамика транспортных и технологических машин. Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2016. 52 с.
8. *Гайдук А. Р.* Непрерывные и дискретные динамические системы. М.: Учебная литература, 2004. 252 с.
9. *Гайдук А. Р., Беляев В. Е., Пьявченко Т. А.* Теория автоматического управления в примерах и задачах с MATLAB. СПб: Лань, 2017. 464 с.
10. *Глазырин Г. В.* Теория автоматического регулирования. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2017. 168 с.
11. Теория автоматического управления. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / Под ред. *А. А. Воронова*. М.: Высш. шк., 1977. 303 с.

Сведения об авторах

Алексей Юрьевич Кутьин — канд. техн. наук, доцент; СК „Медэкспресс“; ведущий программист; E-mail: kutin_alex@mail.ru

Виктор Михайлович Мусалимов — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: musvm@ya.ru

Михаил Сергеевич Малов — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: michaelmalov21@gmail

Поступила в редакцию 10.03.22; одобрена после рецензирования 17.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Kutin A., Musalimov V. *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2019*, 2019. pp. 332–336.
2. Ryabov V.G., Azmetov H.X., Makarov D.A. *Elementy analiticheskoy mekhaniki. Uravneniya Lagranzha II roda i primery resheniya zadach* (Elements of Analytical Mechanics. Lagrange Equations of the Second Kind and Examples of Problem Solving), Moscow, 2011, 76 p. (in Russ.)
3. Routh E.J. *Dynamics of a system of rigid bodies*, London, 1877.
4. Musalimov V.M., Sergushin P.A. *Analiticheskaya mekhanika. Uravneniye Lagranzha vtorogo roda. Svobodnyye kolebaniya* (Analytical Mechanics. The Lagrange Equation of the Second Kind. Free Vibrations), St. Petersburg, 2007, 53 p. (in Russ.)
5. Ovchinnikov V.V. *Prikladnaya mekhanika* (Applied Mechanics), Moscow, 2014, 308 p. (in Russ.)
6. Suslov G.K. *Teoreticheskaya mekhanika* (Theoretical Mechanics), Moscow, 1971, 236 p. (in Russ.)
7. Elyash N.N. *Dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin* (Dynamics of Transport and Technological Machines), Yekaterinburg, 2016, 52 p. (in Russ.)
8. Gaiduk A.R. *Nepreryvnyye i diskretnyye dinamicheskiye sistemy* (Continuous and Discrete Dynamical Systems), Moscow, 2004, 252 p. (in Russ.)
9. Gaiduk A.R., Belyaev V.E., Piavchenko T.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v primerakh i zadachakh s MATLAB* (Automatic Control Theory in Examples and Tasks with MATLAB), St. Petersburg, 2017, 464 p. (in Russ.)
10. Glazyrin G.V. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of Automatic Control), Novosibirsk, 2017, 168 p. (in Russ.)
11. Voronov A.A., ed., *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Chast' 1: Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of Automatic Control. Part 1: Theory of Linear Automatic Control Systems), Moscow, 1977, 303 p. (in Russ.)

Data on authors

Aleksey Yu. Kutin	—	PhD, Associate Professor; Medexpress Insurance JSC; Leading Programmer; E-mail: kutin_alex@mail.ru
Victor M. Musalimov	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: musvm@ya.ru
Mikhail S. Malov	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: michaelmalov21@gmail

Received 10.03.22; approved after reviewing 17.03.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 004.932.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-430-442

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПЛАТФОРМЫ СТЕНДА ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКА

В. Д. Мещеряков*, П. Н. Николаев, А. А. Хусаинов

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, Самара, Россия,
**meshcheryakov.vd@ssau.ru*

Аннотация. Предложена методика определения ориентации платформы стенда полунатурного моделирования угловых движений относительно центра масс наноспутника. Разработанная методика основана на применении стереокамеры, состоящей из инфракрасной камеры и цветной камеры видимого спектрального диапазона. Каждая из таких камер предназначена соответственно для формирования инфракрасных и цветных изображений на обработанных снимках. Работа обеих камер базируется на использовании системы активных оптических маркеров, излучающих в инфракрасном и видимом диапазонах. По снимку, сделанному инфракрасной камерой, определяются центры оптических маркеров с помощью преобразования Хафа. Этим же методом на снимке, полученном цветной камерой, путем оценки фундаментальной матрицы, отфильтровываются посторонние артефакты. После того как цвет маркера с цветного изображения определен, этот признак добавляется к полученным координатам маркеров с инфракрасного изображения. После этого формируется тройка векторов в системе координат платформы стенда и определяется ее ориентация в системе координат инфракрасной камеры. Полунатурное моделирование показало погрешность не выше 0,5°.

Ключевые слова: *определение ориентации, полунатурное моделирование, стереокамера, оптическая система, активные маркеры*

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

Ссылка для цитирования: *Мещеряков В. Д., Николаев П. Н., Хусаинов А. А.* Определение ориентации платформы стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 430—442. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-430-442.

DEFINING THE ORIENTATION OF THE STAND PLATFORM FOR SEMI-NATURAL MODELING OF THE DYNAMICS OF A NANOSATELLITE RELATIVE MOTION

V. D. Meshcheryakov*, P. N. Nikolaev, A. A. Khusainov

Samara University, Samara, Russia
** meshcheryakov.vd@ssau.ru*

Abstract. A technique for determining the orientation of the stand platform for semi-natural modeling of angular motion dynamics relative to the center of mass of a nanosatellite is proposed. The developed technique is based on the use of a stereo camera consisting of an infrared camera and a color camera of the visible spectral range. Each of these cameras is designed, respectively, for the formation of infrared and color images on processed photographs. The operation of both cameras is based on the use of a system of active optical markers emitting in the infrared and visible ranges. Based on the image taken by the infrared camera, the centers of optical markers are determined using the Hough transform. By the same method, extraneous artefacts are filtered out in the image obtained by a color camera by evaluating the fundamental matrix. After the color of the marker from the color image is determined, this feature is added to the obtained coordinates of the markers from the infrared image. After that, a triple of vectors is formed in the coordinate system of the stand platform and its orientation is determined in the coordinate system of the infrared camera. According to results of semi-linear modeling, the orientation error does not exceed 0.5°.

Keywords: semi-natural modeling, stereo camera, optical system, active markers

© Мещеряков В. Д., Николаев П. Н., Хусаинов А. А., 2022

Acknowledments: The work was carried out within the framework of the project 0777-2020-0018, funded from the funds of the state assignment to the winners of the competition of scientific laboratories of educational institutions of higher education subordinate to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation: Meshcheryakov V. D., Nikolaev P. N., Khusainov A. A. Defining the orientation of the stand platform for semi-natural modeling of the dynamics of a nanosatellite relative motion. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 430—442 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-430-442.

Введение. В последнее время в мире возрастает интерес к использованию микро- и наноспутников [1]. Практически любой проект по созданию малого спутника требует минимизации расходов на проектирование и эксплуатацию. Существенную экономию обеспечивают правильный выбор проектных характеристик спутника, а также оптимизация его систем на начальной стадии проектирования. При этом очень важно суметь правильно оценить состав и характеристики системы определения ориентации и стабилизации, а это, в свою очередь, трудно сделать без моделирования [2].

При испытаниях систем определения ориентации и стабилизации наибольшую эффективность показывает метод полунатурного моделирования, позволяющий выявлять потенциальные проблемы в работе на более ранних этапах проектирования, что может существенно снизить материальные и временные затраты на устранение выявленных недостатков [3]. Для подобных испытаний используются стенды полунатурного моделирования, позволяющие определить работоспособность нескольких систем испытываемого оборудования.

В настоящей работе предлагается методика оценки относительного движения платформы стенда полунатурного моделирования динамики наноспутника по активным оптическим маркерам. Стенд используется для отработки алгоритмов управления угловым движением и определения ориентации наноспутника.

Оценка ориентации и движения объектов по изображению с камер является широко распространенным методом, доказавшим свою эффективность во многих областях. Например, в работе [4] камеры и оптические маркеры используются для определения деформации вращающихся лопастей. Подобный подход к использованию камер нашел свое применение в определении вибраций вращающихся механизмов, что позволяет говорить о его высокой разрешающей способности [5]. В работах [4, 5] особо отмечаются преимущества применения оптических методов в тех случаях, когда невозможно использовать блоки инерционных измерений, включающие в себя акселерометры и гироскопы, что позволяет минимизировать влияние измерительной системы на объект испытаний. К преимуществам оптических методов относятся отсутствие дрейфа нуля и накопительных ошибок, образующихся в ходе интегрирования, что позволяет применять их при испытаниях на длительном промежутке времени без каких-либо методов коррекции.

Постановка задачи. В Самарском университете располагается Центр наноспутниковых технологий, оснащенный стендом исследования движения относительно центра масс наноспутника производства компании „Спутникс“ (рис. 1). Стенд состоит из: аэродинамического подвеса, имитатора магнитного поля Земли (по модели IGRF-13), имитатора Солнца и имитатора звездного неба. Воздушный подвес представляет собой сферический подшипник, в котором вместо смазки используется струя газа, подаваемого под давлением с помощью компрессора [6]. Использование подобной системы обеспечивает три степени свободы. Движение объекта испытаний происходит в магнитном поле, что позволяет ему определять свое положение и выполнять демпфирование угловой скорости при помощи магнитных катушек. Определение ориентации происходит и при применении звездных датчиков, для чего на имитатор выводится изображение звездного неба. Стенд позволяет проводить испытания систем ориентации наноспутников массой до 4 кг и габаритами до 120×120×400 мм [7]. В Центре

наноспутниковых технологий стенд используется для испытаний систем ориентации и стабилизации наноспутников формата CubeSat.

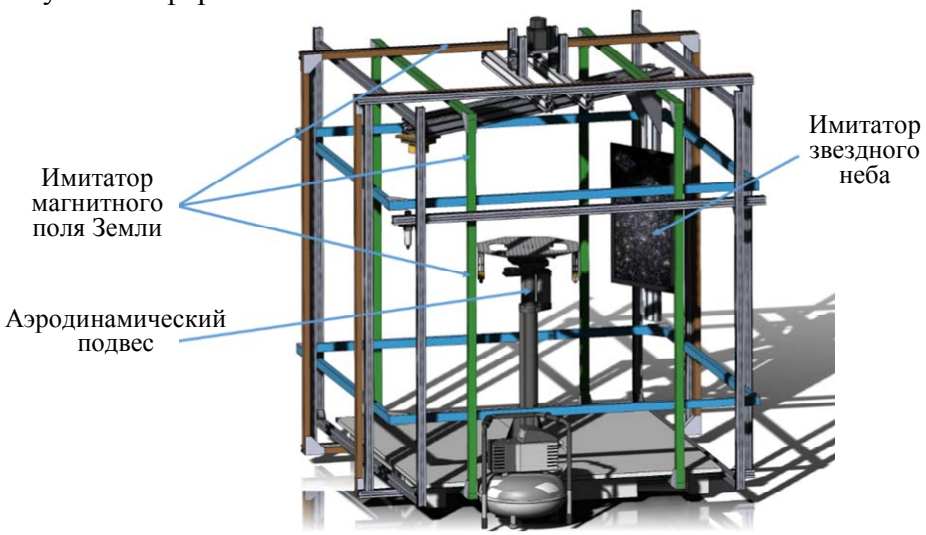


Рис. 1

В комплекте со стендом полунатурного моделирования идет система независимых измерений SXL-AM-05, состоящая из маркеров пассивного типа, штатно размещаемых на платформе (рис. 2) [8].

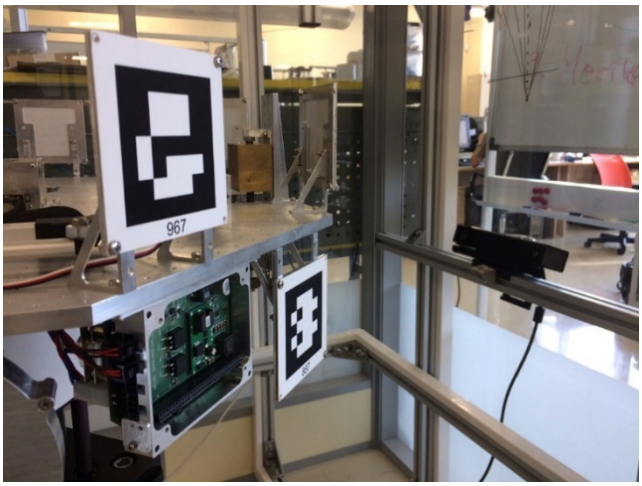


Рис. 2

Большое число шаблонов (до 16 штук) системы приводит к утяжелению платформы, требует значительных вычислительных мощностей из-за сложности необходимых математических расчетов и частично перекрывает объект испытаний, не позволяя проводить испытания звездных датчиков и датчиков Солнца.

В работах [4, 5] также использовались пассивные маркеры с внешним источником подсветки, однако такой подход может нарушить работу датчиков определения направления на Солнце и звездного неба, поэтому в настоящей работе предложено применять активные оптические маркеры. Такая система позволяет уменьшить вес и обеспечить большую видимость объекта испытаний.

В работе [9] использовались оптические маркеры активного типа, закрепленные на концах штанг, что позволяло задавать вектор ориентации в пространстве. Для того чтобы различать векторы, выполнялись штанги различного размера. Чтобы определить направления векторов, используется блок инерционных измерений, установленный в точке пересечения штанг. В отличие от [9], в настоящей работе предложено использовать симметричную конструкцию оптических маркеров на платформе без блока инерционных измерений и для различения векторов использовать маркеры разных цветов.

Система оптических маркеров. Предлагаемая система оптических маркеров состоит из полых пластиковых шаров, закрепленных на платформе аэродинамического стенда. Внутри полого шара размещаются цветной и инфракрасный диоды. Инфракрасный диод необходим для идентификации маркера инфракрасной камеры, цветной — для задания признака маркера, а именно: определения цвета. Схематично маркер представлен на рис. 3, *а*.

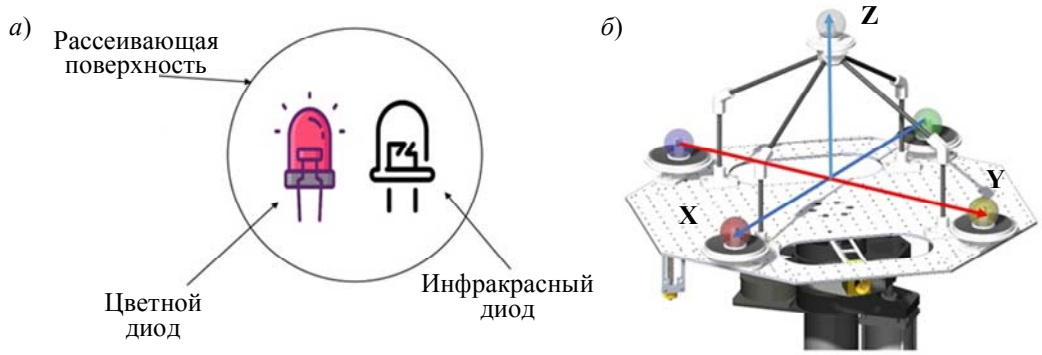


Рис. 3

Пары маркеров синего—желтого и красного—зеленого цветов, расположенные на противоположных сторонах платформы, формируют два ортогональных вектора ориентации. Маркер белого цвета, закрепленный на выносных элементах над центром платформы, вместе с точкой пересечения двух найденных векторов формирует третий вектор ориентации.

При построении векторов ориентации необходимо учитывать, что один из маркеров будет перекрываться объектом испытаний. Поэтому необходимо разместить четыре маркера на платформе, чтобы в любой момент времени в зоне видимости камеры находилось не менее трех маркеров, необходимых для построения двух векторов. Общий вид системы оптических маркеров представлен на рис. 3, *б*.

Методика определения ориентации платформы стенда по активным оптическим маркерам. Предлагается методика, использующая две камеры: инфракрасную и цветную. Инфракрасная камера необходима для определения координат маркеров, цветная — для определения цвета маркеров.

При использовании камер необходимо учитывать искажения, вносимые в изображение линзой. Наибольший вклад в систематическую погрешность оптических систем вносит дисторсия линзы объектива [9, 10]. Математическая модель дисторсии для камеры определяется через следующее выражение:

$$\begin{cases} x'' = x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2(r^2 + 2x'), \\ y'' = y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 x' y' + p_1(r^2 + 2y'), \\ r^2 = x^2 + y^2, \end{cases} \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты радиальной дисторсии; p_1, p_2 — коэффициенты тангенциальной дисторсии; x, y — координаты пикселов на исходном снимке; x'', y'' — координаты точек изображения на снимке с устраненными искажениями [11, 12].

Для поиска координат центров оптических маркеров используется алгоритм Хафа [13]. Этот алгоритм применяется и для цветного снимка, но кроме окружностей, соответствующих оптическим маркерам, он определяет артефакты на фоне. При этом артефакты отсутствуют на инфракрасном снимке, что позволяет использовать модель стереокамеры для фильтрации окружностей на цветном.

Для соотнесения инфракрасного изображения маркера с цветным используется модель стереокамеры. Математическую модель двух проекций точки можно выразить через:

$$\mathbf{x}'^{\mathrm{T}} \mathbf{F} \mathbf{x} = 0, \quad (2)$$

где **F** — фундаментальная матрица стереокамеры (обусловливает связь между любыми двумя изображениями одной и той же сцены, которая показывает, где проекция точек из сцены может находиться на обоих изображениях); **x** — вектор однородных координат точки на изображении первой камеры; **x′** — вектор однородных координат точки на изображении второй камеры. Точки, для которых *справедливо* выражение (2), называются стереопарой [11, 12, 14, 15]. После определения центра оптических маркеров на инфракрасном снимке, который соответствует однородным координатам **x**, когда известны значения фундаментальной матрицы **F**, строится эпиполярная линия на втором изображении, на которой, по определению, находится стереопара.

Уравнение эпиполярной линии получается из (2) [15]:

$$\begin{cases} \mathbf{x}'\mathbf{l} = 0, \\ l = [a \quad b \quad c]^{\mathrm{T}}, \end{cases} \tag{3}$$

где **l** — вектор коэффициентов уравнения прямой:

$$ax + by + c = 0, \tag{4}$$

где *x, y* — координаты эпиполярной прямой на плоскости изображения; *a*, *b*, *c* — коэффициенты прямой на плоскости.

После построения линии происходит „отбрасывание“ окружностей, не соответствующих оптическим маркерам. Производится расчет расстояний от каждой обнаруженной окружности до каждой эпиполярной линии, выбираются наиболее близко расположенные окружности.

Для определения ориентации платформы, согласно алгоритму, необходимо определить цвет каждого маркера. Изображения, получаемые с цветной камеры, состоят из трех компонент — RGB (красный, зеленый, синий цвет) [16]. Для определения цвета маркера по серии снимков заранее находятся средние составляющие цветовых компонент в области, соответствующей границам оптических маркеров. Средние значения каждой цветовой компоненты в области, соответствующей каждому оптическому маркеру, представлены в табл. 1 (диапазон значений от 0 до 255).

Таблица 1

Средние значения цветовых компонент, полученные по серии фотографий

Параметр	Среднее значение для каждой цветовой компоненты, отн. ед.		
Цвет маркера	Красный	Зеленый	Синий
Синий (P_B)	58±19	145±32	221±9
Зеленый (P_G)	90±22	228±10	140±29
Белый (P_W)	239±11	242±11	240±10
Красный (P_R)	241±6	214±20	218±16
Желтый (P_Y)	234±12	219±16	111±19

Значения, указанные в табл. 1, используются в качестве эталонных. Для определения цвета маркеров на каждом кадре необходимо получить средние значения каждой цветовой компоненты внутри окружности каждого маркера и сравнить их с эталонными.

После этого по известному расположению маркеров выполняется построение системы векторов ориентации. Вектор **X** получается вычитанием координат точек синего и зеленого маркеров, вектор **Y** — желтого и красного. Вектор **Z** получается вычитанием координат белого маркера и точки пересечения векторов **X** и **Y**:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{x,y} = P_B - P_G, \\ \mathbf{Y}_{x,y} = P_Y - \dfrac{P_B + P_G}{2}, \\ \mathbf{Z}_{x,y} = P_W - \dfrac{P_B + P_G}{2}. \end{cases} \tag{5}$$

Векторы ориентации, полученные таким способом, являются двумерными. Третья составляющая находится из векторного произведения:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_z = \mathbf{Y}_{x,y} \times \mathbf{Z}_{x,y}, \\ \mathbf{Y}_z = \mathbf{Z}_{x,y} \times \mathbf{X}_{x,y}, \\ \mathbf{Z}_z = \mathbf{X}_{x,y} \times \mathbf{Y}_{x,y}, \end{cases} \tag{6}$$

восстановленные векторы обозначены индексом *r*.

Далее, согласно [9], составляется матрица **M** из восстановленных векторов ориентации платформы стенда:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_x & \mathbf{Y}_x & \mathbf{Z}_x \\ \mathbf{X}_y & \mathbf{Y}_y & \mathbf{Z}_y \\ \mathbf{X}_z & \mathbf{Y}_z & \mathbf{Z}_z \end{pmatrix}. \tag{7}$$

Для нахождения оптимального кватерниона ориентации платформы производится регуляризация, с этой целью составляется матрица Бар—Ицхака:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} m_{11} - m_{22} - m_{33} & m_{21} + m_{12} & m_{31} + m_{13} & m_{23} - m_{32} \\ m_{21} + m_{12} & m_{22} - m_{11} - m_{33} & m_{32} + m_{23} & m_{31} - m_{13} \\ m_{31} + m_{13} & m_{32} + m_{23} & m_{33} - m_{11} - m_{22} & m_{12} - m_{21} \\ m_{23} - m_{32} & m_{31} - m_{13} & m_{12} - m_{21} & m_{11} + m_{22} + m_{33} \end{pmatrix}, \tag{8}$$

где m_{ij} — элементы матрицы (7) [9].

Оптимальный кватернион υ находится как нормализованный собственный вектор, соответствующий максимуму собственного значения матрицы **K**:

$$\hat{q} = [\upsilon_4 \quad \upsilon_1 \quad \upsilon_2 \quad \upsilon_3], \tag{9}$$

где $\upsilon_1, \upsilon_2, \upsilon_3, \upsilon_4$ — элементы нормализованного собственного вектора.

Таким образом, методика работы с получаемыми изображениями имеет следующий порядок:

1) получение изображений со стереокамеры;
2) устранение дисторсии с помощью калибровочных коэффициентов;
3) выполнение фильтрации инфракрасного изображения;
4) поиск границ маркеров и их центров на инфракрасном снимке;
5) поиск границ маркеров и их центров на цветном изображении;
6) определение цвета маркеров;
7) формирование векторов ориентации платформы стенда.

Анализ точностных характеристик методики. Перед проведением экспериментов с использованием системы оптических маркеров на аэродинамическом подвесе стенда было проведено математическое моделирование алгоритма. Задача моделирования заключается в том, чтобы построить трехмерную систему векторов, выполнить поворот данной системы и по двумерным координатам с помощью предложенной методики вычислить углы поворота системы. Рассматривались два варианта отклонения от центра маркера: два пиксела — это соответствует ошибке определения центра маркера с помощью камеры; пять пикселов — это

равняется наименьшему радиусу маркера, определенному на инфракрасном изображении, и рассматривается как предельный случай ошибки. Было проведено 400 итераций моделирования по равномерному закону для каждого варианта распределения ошибок.

Были заданы точки, соответствующие положению маркеров в трехмерной системе координат. Координаты точек были подобраны таким образом, чтобы составить трехмерные ортогональные векторы единичной длины:

$$P_R = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \end{pmatrix};\ P_B = \begin{pmatrix} 1,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \end{pmatrix};\ P_W = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0,5 \end{pmatrix};\ P_{cross} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0,5 \end{pmatrix};\ P_G = \begin{pmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 1 \end{pmatrix};\ P_Y = \begin{pmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Составленные векторы единичной длины образуют систему, аналогичную системе расположения маркеров на стенде по формуле (5):

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \dfrac{P_R - P_B}{\|P_R - P_B\|}; \\ \mathbf{Y} = \dfrac{P_G - P_Y}{\|P_G - P_Y\|}; \\ \mathbf{Z} = \dfrac{P_W - P_{cross}}{\|P_W - P_{cross}\|}. \end{cases} \tag{10}$$

Затем выполняется поворот системы векторов с использованием матрицы поворота **R**:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix},$$

где использованы следующие тестовые углы поворота $\alpha = 10°$, $\beta = 20°, \gamma = 30°$.

Ниже представлен пример расчета для одной реализации случайной ошибки в два пиксела. Изначальная система векторов имеет следующие значения:

$$\mathbf{X}_{in} = \begin{pmatrix} 0,813 \\ -0,441 \\ 0,378 \end{pmatrix};\ \mathbf{Y}_{in} = \begin{pmatrix} 0,469 \\ 0,883 \\ 0,018 \end{pmatrix};\ \mathbf{Z}_{in} = \begin{pmatrix} -0,342 \\ 0,163 \\ 0,925 \end{pmatrix}.$$

Согласно математической модели преобразования координат проективной камерой, которая описывает связь положения объекта в пространстве и его изображения, получаемого камерой, третья координата, соответствующая расстоянию от плоскости камеры до точки изображения, устранялась [11]:

$$\mathbf{X}_{x,y} = \begin{pmatrix} 0,813 \\ -0,441 \\ 0 \end{pmatrix};\ \mathbf{Y}_{x,y} = \begin{pmatrix} 0,469 \\ 0,883 \\ 0 \end{pmatrix};\ \mathbf{Z}_{x,y} = \begin{pmatrix} -0,342 \\ 0,163 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Данные векторы получены с инфракрасного снимка и наделены признаком цвета. Восстановление третьей координаты происходит с помощью векторного произведения (5):

$$\mathbf{X}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,378 \end{pmatrix};\ \mathbf{Y}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,018 \end{pmatrix};\ \mathbf{Z}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,925 \end{pmatrix}.$$

По формуле (7) рассчитывается матрица **M**:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0,813 & 0,469 & -0,342 \\ -0,441 & 0,883 & 0,163 \\ 0,378 & 0,018 & 0,925 \end{pmatrix},$$

а по формуле (8):

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} -0,331 & 0,009 & 0,012 & 0,048 \\ 0,009 & -2,86 & 0,061 & 0,241 \\ 0,012 & 0,061 & -0,257 & 0,303 \\ 0,048 & 0,241 & 0,303 & 0,874 \end{pmatrix}.$$

Для матрицы **K** максимальное собственное значение находится в четвертом столбце, и кватернион:

$$\hat{q} = \begin{bmatrix} 0,951 & 0,038 & 0,189 & 0,239 \end{bmatrix}.$$

Подобным образом производились вычисления и для ошибки, моделирующей отклонение в пять пикселов. Математические ожидания и среднеквадратические отклонения, получившиеся в результате статистического моделирования, для обоих случаев представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты статистического моделирования

Ошибка, пикселы	M_α ,…°	σ_α ,…°	M_β ,…°	σ_β ,…°	M_γ ,…°	σ_γ ,…°
2	10,01	0,215	19,98	0,183	30,00	0,158
5	9,99	0,523	19,98	0,472	30,01	0,397

Экспериментальное определение ориентации. На стенде полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника в качестве камер используются устройства Microsoft Kinect первого поколения (рис. 4).

Рис. 4

Устройство включает цветную камеру и инфракрасный излучатель, который совместно с инфракрасной камерой представляет собой датчик глубины. Система оптических маркеров и наноспутник расположены на платформе стенда. Камера фиксирует положение платформы,

выдает кадр в систему обработки изображений, которая определяет положение маркеров и вычисляет ориентацию платформы.

Был проведен эксперимент по предложенной методике для определения коэффициентов устранения дисторсии и фундаментальной матрицы стереокамеры, с применением пакета прикладных программ MatLab и приложения Stereo Camera Calibrator [12]. Особенностью этих камер является тот факт, что значение тангенциальной дисторсии ниже, чем достигаемый уровень точности определения дисторсии [10].

Для определения коэффициента дисторсии в поле зрения обеих камер помещался шахматный шаблон и выполнялась серия снимков. На рис. 5 проиллюстрирована работа приложения MatLab Stereo Camera Calibrator [17], служащего для определения ключевых точек.

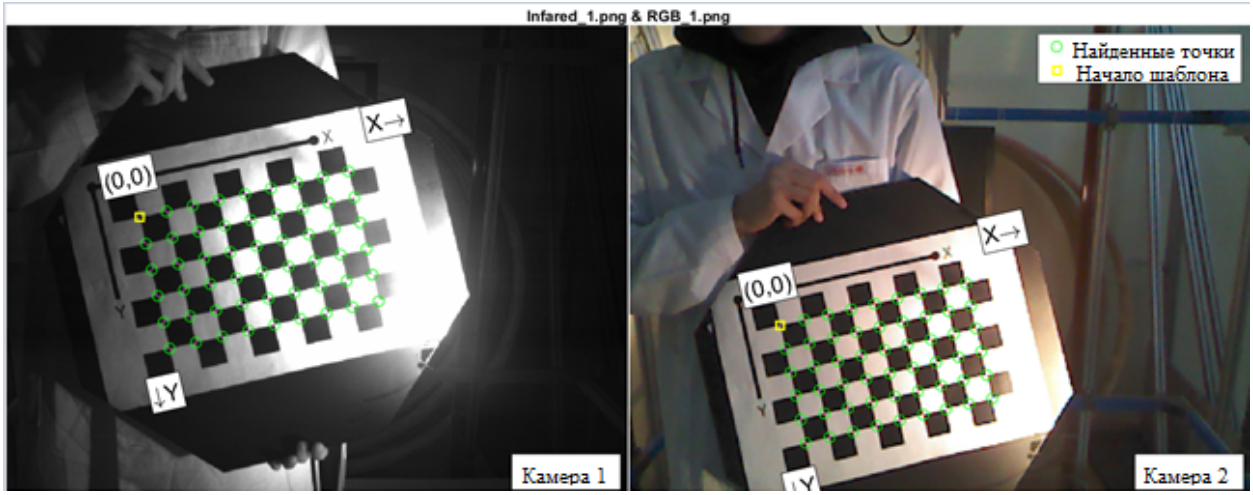


Рис. 5

Значения коэффициентов дисторсии получались для двух устройств Microsoft Kinect (в табл. 3 обозначены „кинект 0“ и „кинект 1“, коэффициенты тангенциальной дисторсии равны нулю).

Таблица 3

Значения коэффициентов радиальной дисторсии

Камера	k_1, отн. ед.	k_2, отн. ед.
IR кинект 0	–0,1208	0,3584
IR кинект 1	–0,1581	0,6517
RGB кинект 0	0,0460	–0,1167
RGB кинект 1	0,0444	–0,1368

С помощью шахматных шаблонов и приложения MatLab StereoCamera Calibrator экспериментально получены значения фундаментальной матрицы, необходимые для фильтрации окружностей на цветном снимке, не соответствующих оптическим маркерам:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0,00275 & -0,13 & 287 \\ 0,12 & -0,45 & 30 \\ -268 & 33 & -7150 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}.$$

Выполнена пороговая фильтрация полученного инфракрасного изображения (рис. 6, *а*) по уровню 9500. Значение уровня фильтрации определялось экспериментально. Далее устранена дисторсия и выполнен поиск центров маркеров при помощи алгоритма Хафа [13]. Пример найденных маркеров показан на рис. 6, *б*.

а) *б*)

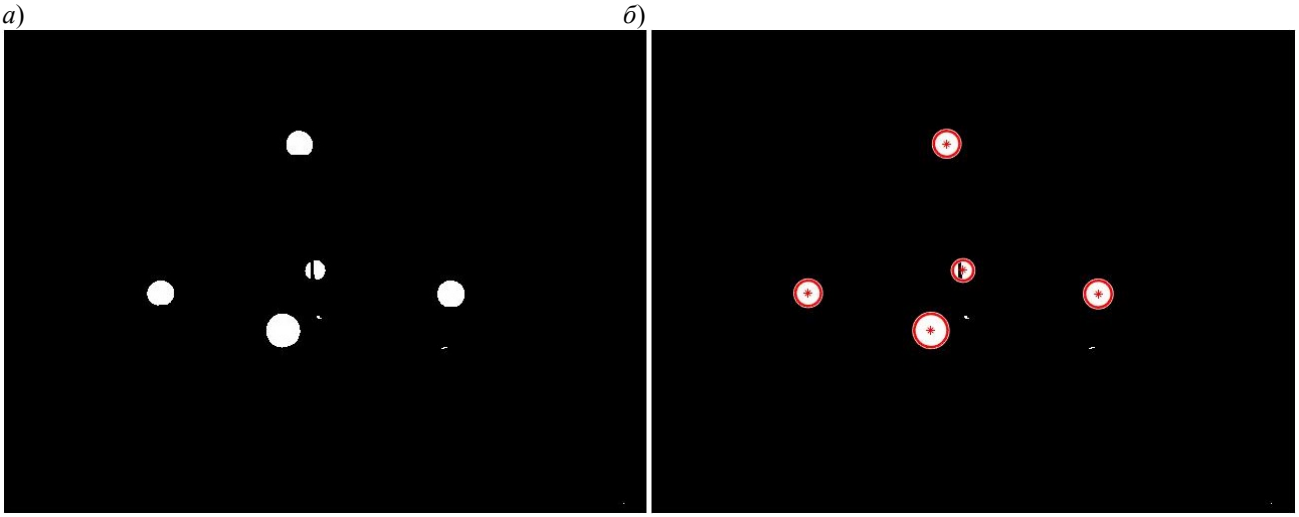


Рис. 6

На цветном снимке также была устранена дисторсия (рис. 7, *а*), после чего производился поиск окружностей на снимке, но при этом алгоритм Хафа определил окружности, не соответствующие оптическим маркерам (рис. 7, *б*).

а) *б*)

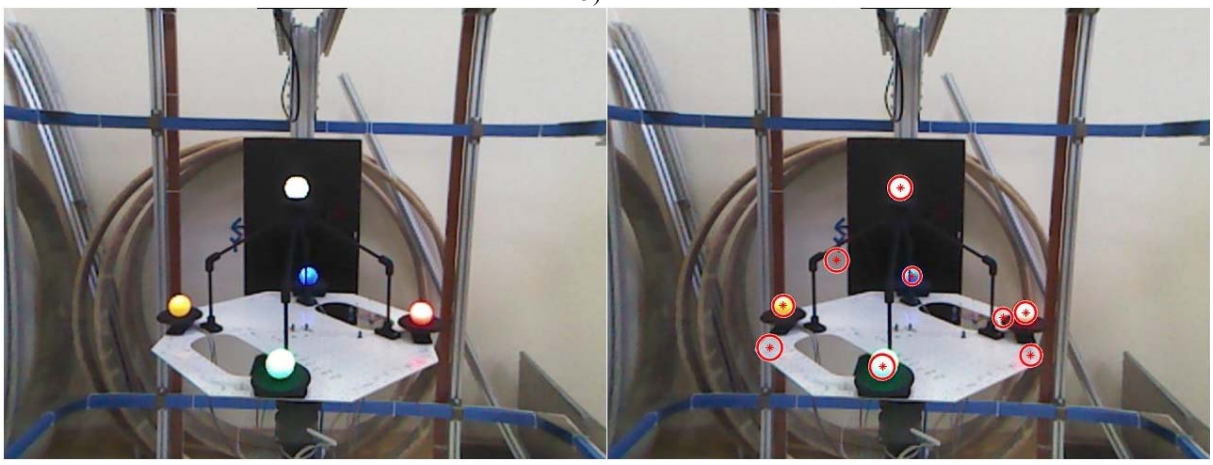


Рис. 7

С помощью фундаментальной матрицы стереокамеры и координат центров оптических маркеров были построены эпиполярные линии. Изображения с эпиполярными линиями и отфильтрованными окружностями приведены на рис. 8, *а* и *б*.

а) *б*)

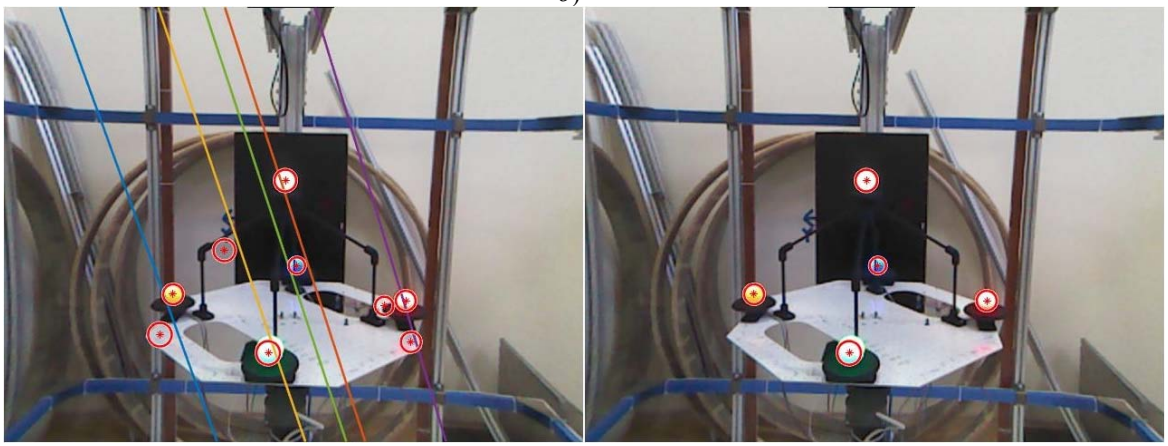


Рис. 8

После фильтрации окружностей были определены цвета. Векторы ориентации были составлены парами из маркеров „зеленый—синий“ и „красный—желтый“. Третий вектор ориентации получен на пересечении двух векторов ориентации и координат центра белого маркера (табл. 4).

Таблица 4

Координаты центров маркеров на изображении

Маркер	Координата *X*, усл. ед.	Координата *Y*, усл. ед.
Красный	444	324
Зеленый	292	382
Синий	324	285
Желтый	187	317
Белый	311	192

Далее по предложенной методике был посчитан кватернион ориентации и пересчитан в углы ориентации платформы в системе координат камеры: угол поворота относительно оси X — 9,7067°; относительно оси Y — –6,7848°; относительно оси Z — 1,6992°.

Заключение. Оценена возможность использования стереокамеры для бесконтактного определения ориентации платформы. Разработана и реализована система активных маркеров на платформе стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника. Также разработана методика определения ориентации платформы стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника с помощью активных маркеров. Погрешность определения ориентации платформы для крайнего случая определения центра оптического маркера в пять пикселов составляет не более 0,5°.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каширин А. В., Глебанова И. И.* Анализ современного состояния рынка наноспутников как подрывной инновации и возможностей его развития в России // Молодой ученый. 2016. № 7(111). С. 855—867.
2. Лабораторный стенд для полунатурной отработки систем ориентации микро- и наноспутников. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, 2021 [Электронный ресурс]: <https://keldysh.ru/papers/2008/prep38/prep2008_38.html>. (дата обращения 11.06.2021).
3. *Игрицкий В. А., Майорова В. И.* Особенности разработки модульных аппаратно-программных комплексов полунатурного моделирования систем управления и навигации малоразмерных космических аппаратов // Наука и Образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 13.
4. *Meitu Ye, Jin Liang, Leigang Li, Boxing Qianc, Maodong Ren, Mingkai Zhang, Wang Lu, Yulong Zong*. Full-field motion and deformation measurement of high speed rotation based on temporal phase-locking and 3D-DIC // Optics and Lasers in Engineering. 2021. Vol. 146, N 6. P. 106697.
5. *Jinzhao Y., Tse P.* Sparse representation of complex steerable pyramid for machine fault diagnosis by using non-contact video motion to replace conventional accelerometers // Measurement. 2021. N 175365. February 2021. DOI:10.1016/j.measurement.2021.109104.
6. Элементы стенда полунатурного моделирования. „Спутникс“, частная космическая компания. 2021 [Электронный ресурс]: <https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturnogo-modelirovaniya>. (дата обращения 28.05.2021)
7. Полунатурный испытательный стенд отработки бортовых систем ориентации и стабилизации наноспутников. Центр наноспутниковых технологий. 2021 [Электронный ресурс]: <https://spacetest.ru/index.php?id=orient>. (дата обращения 28.05.2021).
8. Система независимых измерений. „Спутникс“, частная космическая компания. 2021 [Электронный ресурс]: <https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturnogomodelirovaniya/sistema-nezavisimyix-izmerenij>. (дата обращения 28.05.2021).
9. *Madgwick Sebastian O. H.* An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. University of Bristol, 2010 [Электронный ресурс]: <https://www.researchgate.net/publication/ 267197884_ An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays>.

10. *Branko K*. Calibration of Kinect-type RGB-D Sensors for Robotic Applications // FME Transactions. 2015. Vol. 43, N 1. P. 47—54. DOI:10.5937/fmet1501047K.
11. *Hartley R. I., Zisserman A*. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge, 2003. https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685.
12. Основы стереозрения // Хабр, сообщество IT-специалистов. 2021 [Электронный ресурс]: <https://habr.com/ru/post/130300/>. (дата обращения 31.05.2021).
13. *Svalbe I. D.* Natural representation for straight fines, the Hough transform on discrete arrays // IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence. 1989. Vol. II, N 9. pp. 286.
14. CamCal 011 Fundamental Matrix. Data Hackers. 2021 [Электронный ресурс]: <http://datahacker.rs/camera-calibration-essential-matrix-computation>. (дата обращения 31.05.2021).
15. *Ribo M.* A new Optical Tracking System for Virtual and Augmented Reality Applications // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Budapest, 2001.
16. О цветовых пространствах. Хабр, сообщество IT-специалистов. 2021 [Электронный ресурс]: <https://habr.com/ru/post/181580>. (дата обращения 31.05.2021).
17. Stereo Camera Calibrator App. MathWorks. 2021 [Электронный ресурс]: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/stereo-camera-calibrator-app.html>. (дата обращения 31.05.2021).

Сведения об авторах

Вадим Дмитриевич Мещеряков — Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований; НИЛ-102, инженер-программист;
E-mail: swedish2015@yandex.ru

Пётр Николаевич Николаев — канд. физ.-мат. наук; Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований; НИЛ-102, научный сотрудник;
E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru

Александр Александрович Хусаинов — магистр; Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований; НИЛ-102, инженер-программист;
E-mail: husa142508@gmail.com

Поступила в редакцию 19.01.22; одобрена после рецензирования 03.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Kashirin A.V., Glebanova I.I. *Molodoy uchenyy* (Young Scientist), 2016, no. 7(111), pp. 855–867. (in Russ.)
2. https://keldysh.ru/papers/2008/prep38/prep2008_38.html. (in Russ.)
3. Igritsky V.A., Mayorova V.I. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2011, no. 13, pp. 16. (in Russ.)
4. Meitu Ye, Jin Liang, Leigang Li, Boxing Qianc, Maodong Ren, Mingkai Zhang, Wang Lu, Yulong Zong, *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, no. (6)146, pp. 106697. DOI:10.1016/j.optlaseng.2021.106697.
5. Jinzhao Yang, Peter Tse, *Measurement*, 2021, no. 175(365), pp. 109104. DOI:10.1016/j.measurement.2021.109104.
6. https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturnogo-modelirovaniya/. (in Russ.)
7. https://spacetest.ru/index.php?id=orient. (in Russ.)
8. https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturnogomodelirovaniya/sistema-nezavisimyix-izmerenij. (in Russ.)
9. Madgwick Sebastian O.H., *University of Bristol*, 2010, https://www.researchgate.net/publication/267197884_An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays.
10. Branko K. *FME Transactions*, 2015, no. 1(43), pp. 47–54. DOI:10.5937/fmet1501047K.
11. Hartley R.I., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge, 2003, https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685.
12. https://habr.com/ru/post/130300/ (in Russ.).
13. Svalbe I.D. *IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1989, no. 9II), pp. 286.
14. *CamCal 011 Fundamental Matrix*, 2021, http://datahacker.rs/camera-calibration-essential-matrix-computation.
15. Ribo M. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Budapest, 2001.
16. https://habr.com/ru/post/181580/.(in Russ.)
17. *Stereo Camera Calibrator App*, MathWorks, 2021https://www.mathworks.com/help/vision/ug/stereo-camera-calibrator-app.html/.

Data on authors

Vadim D. Meshcheryakov — Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102, Engineer-Programmer; E-mail: swedish2015@yandex.ru

Petr N. Nikolaev — PhD; Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102, Researcher; E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru

Alexander A. Khusainov — M. Sc.; Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102, Engineer-Programmer;
E-mail: husa142508@gmail.com

Received 19.01.22; approved after reviewing 03.03.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 681.2-2
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-443-450

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ РАЗМЕРОВ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР В ПРЕЦИЗИОННОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Л. В. Строк*, В. А. Коднянко, В. С. Секацкий

Политехнический институт Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия,
**klw111@mail.ru*

Аннотация. Показана актуальность использования газостатических опор в подвижных узлах современного измерительного оборудования. Разработана математическая модель газостатической опоры с двойным дросселированием. Модель позволяет анализировать влияние отклонений размеров опоры на ее эксплуатационные характеристики. Даны рекомендации по нормированию точности наружного диаметра опоры, диаметра расположения дросселирующих отверстий и диаметров самих дросселирующих отверстий. Данные рекомендации можно использовать при проектировании подвижных узлов прецизионного измерительного оборудования.

Ключевые слова: *газостатические опоры, прецизионное измерительное оборудование, отклонения размеров, эксплуатационные характеристики*

Ссылка для цитирования: *Строк Л. В., Коднянко В. А., Секацкий В. С.* Влияние отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные характеристики // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 443—450. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-443-450.

INFLUENCE OF SIZE DEVIATIONS OF GAS-STATIC SUPPORTS IN PRECISION MEASURING EQUIPMENT ON THEIR OPERATIONAL CHARACTERISTICS

L. V. Strok*, V. A. Kodnyanko, V. S. Sekatsky

Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,
**klw111@mail.ru*

Abstract. The relevance of using gas-static bearings in moving parts of modern measuring equipment is shown. A mathematical model of a gas-static support with double throttling has been developed, which makes it possible to analyze the effect of deviations in the dimensions of the bearing and its operational characteristics. Recommendations are given for standardizing the accuracy of the outer diameter of the support, the diameter of the location of the throttling holes and the diameters of the throttling holes themselves. These recommendations can be used in the design of moving parts of precision measuring equipment.

Keywords: gas-static bearings, precision measuring equipment, dimensional deviations, performance characteristics

For citation: Strok L. V., Kodnyanko V. A., Sekatsky V. S. Influence of size deviations of gas-static supports in precision measuring equipment on their operational characteristics. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 443—450 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-443-450.

Введение. Современные требования к эксплуатационным свойствам продукции и их контролю обязывают производителей повышать точностные характеристики выпускаемого измерительного оборудования. Высокая точность измерительного оборудования актуальна и при выполнении научно-исследовательских работ. Важность этого подтверждается постановлением правительства РФ от 27.12.2019 № 1875 (Об утверждении Правил предоставления грантов в форме субсидий из федерального бюджета на реализацию мероприятий, направленных на обновление приборной базы ведущих организаций, выполняющих научные исследования и разработки, в рамках федерального проекта „Развитие инфраструктуры для научных

© *Строк Л. В., Коднянко В. А., Секацкий В. С., 2022*

исследований и подготовки кадров“ национального проекта „Наука и университеты“)*, которое направлено на обновления не менее 50 % приборной базы до 2024 г. в ведущих организациях, выполняющих научные исследования и разработки.

Точность измерения геометрических параметров продукции можно повысить за счет снижения погрешности самих средств измерения, что подтверждается отдельными результатами исследований, проведенных в этом направлении [1—3].

Для измерения размеров, отклонений формы и расположения поверхностей деталей сложной формы (например, корпусных деталей) с повышенными требованиями к точности измерения все чаще применяют координатно-измерительные машины (КИМ). Литературно-патентный анализ, проведенный авторами ранее [4], показал, что практически во всех КИМ перемещение подвижных узлов осуществляется по направляющим с газостатическими опорами. В КИМ используют различные конструкции газостатических опор, однако рекомендации по их выбору и проектированию не выявлены.

В Политехническом институте СФУ накоплен большой опыт по проектированию, изготовлению и исследованию газостатических опор, который позволяет рекомендовать для направляющих КИМ использование газостатических опор с двойным дросселированием расхода воздуха [4]. Способ двойного дросселирования, разработанный в Красноярском политехническом институте [5], является одним из наиболее удобных и эффективных для повышения устойчивости. При двойном дросселировании (рис. 1) в магистрали нагнетания последовательно располагаются основное дросселирующее сопротивление (простая диафрагма, d_p), обеспечивающее компенсацию расхода воздуха, и дополнительные дросселирующие сопротивления (кольцевая диафрагма, d_k), предназначенные для распределения воздуха по площади несущего слоя h и выполнения функции динамических демпферов.

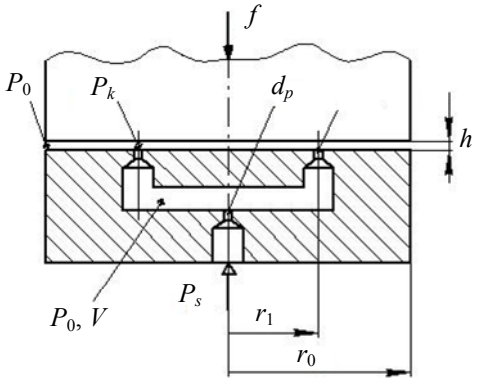


Рис. 1

В большом количестве исследований газостатических опор с двойным дросселированием [6—12] показано, что данный способ повышает устойчивость опоры, улучшает динамические характеристики и технологичность конструкции.

При проектировании газостатической опоры проводят расчеты параметров и характеристик по номинальным значениям. К геометрическим параметрам опоры с двойным дросселированием можно отнести наружный радиус r_0 (см. рис. 1), радиус расположения питателей r_1, диаметры самих питателей d_p. При заданных внешней нагрузке f и параметре настройки опоры ς рассчитывают зазор в опоре h, который обеспечивает позиционирование подвижной части опоры.

Коэффициент настройки демпфирующих дросселей определяется выражением

$$\varsigma = \frac{P_{p0}^2 - P_{k0}^2}{P_s^2 - P_{k0}^2} \in [0,1]. \qquad (1)$$

* Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2019 г. № 1875 // Собрание законодательства. 2020. № 2. Ст. 166, № 33, Ст. 5383.

где P_{k0} — безразмерное давление на выходе кольцевых диафрагм P_k при расчетном безразмерном зазоре $H = 1$, P_{p0} — безразмерное давление на выходе простых диафрагм P_p, P_s — безразмерное давление наддува.

Если $\varsigma = 0$, то $P_{k0} = P_{p0}$, что равносильно отсутствию кольцевых диафрагм и одинарному дросселированию через простую диафрагму диаметра d_p. Если $\varsigma = 1$, то $P_s = P_{p0}$, и это соответствует режиму одинарного дросселирования через кольцевые диафрагмы диаметра d_k. Следовательно, двойное дросселирование будет иметь место при $0 < \varsigma < 1$. При малых ς большее сопротивление приходится на простую диафрагму, при ς, близких к 1, главную роль будут играть кольцевые диафрагмы. Исследования показывают, что наилучшими по качеству как статики, так и динамики, являются значения $\varsigma \in [0,2; 0,3]$ [6].

Действительные размеры изготовленных элементов газостатической опоры отличаются от номинальных значений. Рассмотрим влияние отклонений основных размеров опоры на точность позиционирования ее подвижной части.

Влияние отклонения размеров наружного диаметра на положение подвижной части опоры. Вследствие погрешностей изготовления опоры величина наружного радиуса r_0 отличается от расчетной. При этом, очевидно, будут отличаться от расчетных значений безразмерные величины внутреннего радиуса R_1, давления P_k на выходе питателей и зазора H. С учетом этого радиус расположения питателей теперь будет определяться формулой $R_{1R} = r_1/r_{0R}$, где r_{0R} — реальный радиус подпятника. Будем считать, что нагрузка f на подпятник остается неизменной и ее величина определяется расчетом при $r_{0R} = r_0$.

Запишем размерное уравнение баланса сил в следующем виде:

$$2r_{0N}^2 p_a \int_0^1 R\left(P - 1\right) dR = f. \tag{2}$$

В этом уравнении неизвестно лишь безразмерное давление P_k. Найдем его методом половинного деления [13]. Границы интервала неопределенности определим из условия $P_k \in [1, P_s]$.

Вычислив давление P_k, найдем далее измененный зазор H. Поскольку параметр настройки ς мал, можно считать, что на выходе питателей $P_p \approx P_k$. В этом случае уравнение баланса расходов можно записать в виде

$$Q_h = Q_p, \tag{3}$$

где

$$Q_p = A_p \Pi(P_s, P_k), \tag{4}$$

$$Q_h = A_h H^3 (P_k^2 - 1). \tag{5}$$

Здесь Q_h, Q_p — безразмерные массовые расходы смазки через несущий слой и дроссель; A_h, A_p — безразмерные критерии подобия гидравлического сопротивления несущего слоя и дросселя.

Из уравнения баланса расходов (3) можно получить зависимость безразмерного H и размерного h зазоров от давления P_k:

$$H = \sqrt[3]{\frac{A_p \Pi(P_s, P_k)}{A_h (P_k^2 - 1)}}, h = h_0 H. \tag{6}$$

Расчеты были проведены для трех типоразмеров опор с номинальными значениями наружного радиуса: 25 (рис. 2, *а*), 50 (*б*) и 75 мм (*в*). Для каждой опоры расчеты выполнены для трех номинальных значений зазоров 10, 20 и 30 мкм.

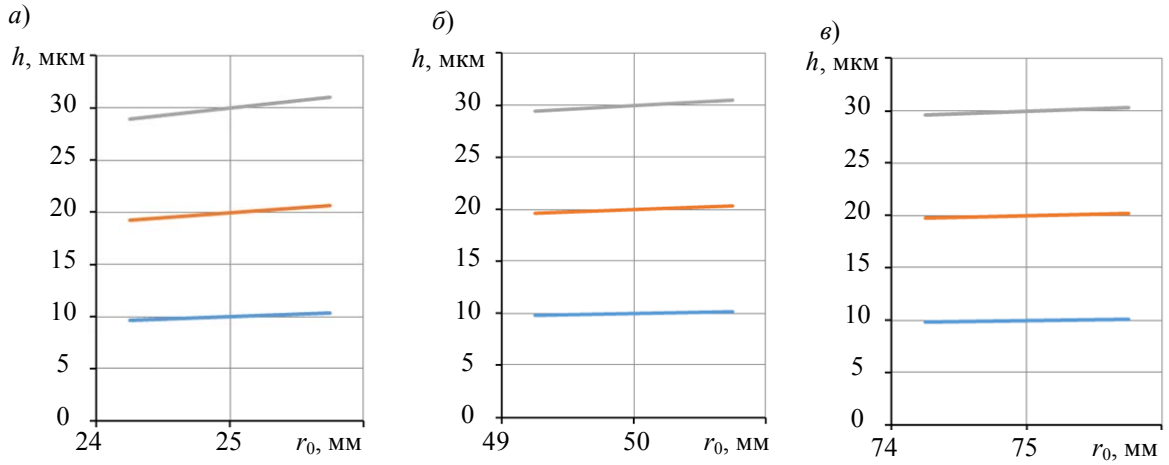


Рис. 2

При теоретическом исследовании использован радиус наружной поверхности. На рабочих чертежах указываются номинальный диаметр и его предельные отклонения. Наружный диаметр опоры относится к свободным (несопрягаемым) размерам, которые изготавливаются по квалитетам точности 12—16. Исследования показали, что изменение наружного диаметра в пределах допуска по 12-му квалитету повлечет за собой изменение зазора в пределах 1 % от номинального значения, а нормирование наружного диаметра по 16-му квалитету — от 6 до 8 %. При номинальной величине зазора в 20 мкм 8 % в отклонении наружного диаметра изменит точность позиционирования подвижной части, например координатно-измерительной машины, на 1,6 мкм, что недопустимо для прецизионного измерительного оборудования.

По результатам исследования рекомендуем для нормирования точности наружного диаметра газостатических опор использовать 14-й квалитет точности, который относится к среднему условному классу точности и широко используется в машиностроении и приборостроении для нормирования точности свободных размеров. В сравнении с 16-м квалитетом точности 14-й квалитет позволит в два раза и более повысить точность позиционирования подвижной части опоры без существенного увеличения стоимости изготовления в связи с отсутствием необходимости использования при изготовлении опоры технологического оборудования повышенной точности.

Влияние погрешности радиуса расположения осей отверстий питателей газостатической опоры на величину расчетного зазора. На несущей поверхности газостатической опоры с двойным дросселированием (как и для других типов газостатических опор) выполняются отверстия питателей (дросселей), которые расположены по заданному радиусу опоры через определенный угловой размер. Допуски на расположение осей отверстий регламентирует ГОСТ 14140-81[*], который предназначен для обеспечения взаимозаменяемости двух соединяемых поверхностей и для данного случая не подходит. Рекомендации этого стандарта распространяются только для крепежных деталей и не предполагают использования для нормирования точности расположения осей отверстий питателей газостатической опоры.

Точность положения угловых координат отверстий питателей практически не влияет на результаты исследования, согласно допущениям, которые приняты в математической модели опоры. Были проведены дополнительные исследования влияния радиальной составляющей. Для этого наружный радиус принимался в качестве постоянной величины, а радиус располо-

[*] ГОСТ 14140-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски расположения осей отверстий для крепежных деталей. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. 31 с.

жения осей отверстий питателей газостатической опоры варьировали в пределах 11—14 мм (для опоры с наружным диаметром 25 мм, рис. 3).

При математическом моделировании и расчетах изменяли значение радиуса расположения питательных отверстий r_1. Это повлекло за собой отличие от расчетных значений безразмерных величин давления P_k и зазора H. С учетом этого радиус расположения осей отверстий питателей определяется по формуле $R_{1R} = r_{1R} / r_0$, где r_{1R} — реальный внутренний радиус. Уравнение баланса сил примет вид

$$2r_0^2 p_a \int_0^1 R(P-1)\,dR = f. \tag{7}$$

После вычисления по описанной методике неизвестного давления P_k находили зазоры по формуле (1). Результаты расчетов зависимости изменения толщины несущего слоя h в газостатической опоре от изменения радиуса расположения питательных отверстий r_1 при различных значениях номинального зазора h_0 представлены на рис. 3

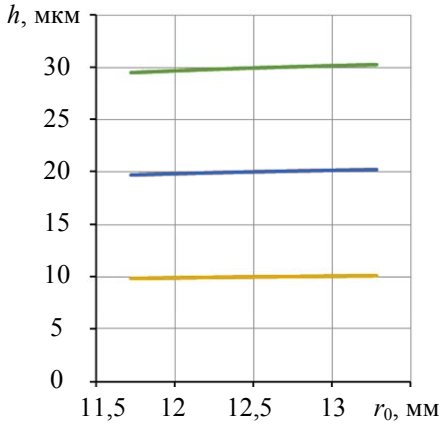


Рис. 3

Анализ показал, что при проектировании газостатической опоры допуски на диаметр расположения осей питательных отверстий необходимо назначать по 14-му квалитету, как и для наружного диаметра опоры.

Влияние погрешности диаметра дросселирующего отверстия на величину расчетного зазора. Одним из сложных элементов технологической цепочки изготовления элементов газостатической опоры является обеспечение необходимого диаметра дросселирующего отверстия по рабочим чертежам опоры. Сложность заключается не только в технологической, но и в конструкторской подготовке технической документации. На сегодняшний день отсутствуют какие-либо рекомендации по проектированию данного типа опор. Экспериментально, и в какой-то мере теоретически, установлено, что диаметр дросселирующих отверстий составляет десятые доли миллиметра. Инструментальные возможности для изготовления отверстий малых диаметров ограничены. Кроме того, на точность изготовления отверстий малого диаметра существенно влияют технологические факторы. Для выявления влияния погрешности диаметра дросселирующего отверстия на величину расчетного зазора проведены теоретические исследования. Переменным параметром в данном случае является d_p и, следовательно, зависящий от него параметр A_p. Поскольку данная зависимость является квадратичной, то формула для вычисления измененного параметра A_p примет вид

$$A_{pR} = A_p \left(\frac{d_{pR}}{d_p} \right)^2, \tag{8}$$

где d_{pR} — реальный диаметр отверстия.

С учетом этого формулы (6) для определения зазоров примут вид

$$H = \sqrt[3]{\frac{A_{pR}\Pi(P_s, P_k)}{A_h(P_k^2 - 1)}}, h = h_0 H. \quad (9)$$

Исследования проведены для газостатической опоры с номинальными геометрическими параметрами r_0 = 25 и r_1 = 12,5 мм. Показано, что на характеристики опоры влияют отклонения размеров диаметра дросселирующих отверстий, которые составляют десятые и тысячные доли миллиметра (рис. 4).

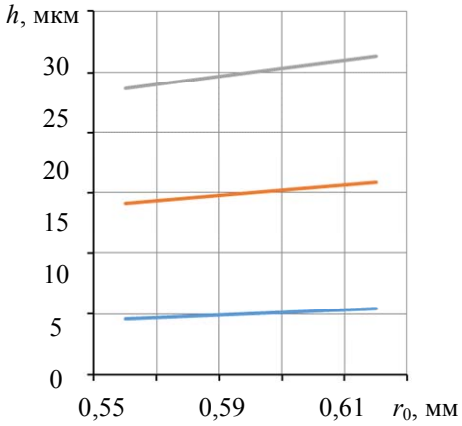


Рис. 4

Расчеты проведены для номинальных расчетных зазоров в опоре h_0 = 10, 20, 30 мкм. Диаметр дросселирующих отверстий меняли от номинального значения 0,6 мм до ±0,04 мм.

Расчеты показывают, что при зазоре в опоре 20 мкм изменение диаметра дросселирующих отверстий от номинального значения 0,6 мм в пределах 7-го квалитета (допуск 10 мкм) приведет к изменению зазора в опоре в пределах 2 %. Погрешность дросселирующих отверстий в пределах допуска в 40 мкм, что соответствует 10-му квалитету, приведет к изменению зазора в пределах 5 %. Дальнейшее увеличение допуска нецелесообразно, поскольку приведет к изменению номинального размера диаметра дросселирующего отверстия.

Заключение. Разработана математическая модель аэростатической опоры с двойным дросселированием воздуха в магистрали нагнетания, позволяющая определить изменения основных характеристик опоры в зависимости от отклонений размеров опорных поверхностей и дросселирующих устройств.

Исследования показали, что изменение наружного диаметра опоры и диаметра расположения дросселирующих отверстий в пределах квалитетов 12—16 повлечет за собой изменение зазора, а следовательно и положение подвижной части опоры, в пределах от 1 до 8 %. При проектировании аэростатических опор нормирование точности наружного диаметра и диаметра расположения дросселирующих отверстий рекомендуется осуществлять по 14-му квалитету точности.

Наиболее чувствительны характеристики опоры к изменению размеров самих дросселирующих отверстий, точность которых при изготовлении должна соответствовать квалитетам 8—10. Повышение точности менее 8-го квалитета связано с технологическими и экономическими проблемами, а снижение точности грубее 10-го квалитета приведет к изменению расходных характеристик опоры более чем на 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чигрик Н. Н.* Исследование влияния погрешности средства измерений на параметры разбраковки и точность технологического процесса при измерительном контроле высоты поршневых колец автомобильного двигателя // Омский научный вестник. 2014. № 2(130). С. 86—92.

2. *Сиденко О. Е.* Влияние погрешности измерения на результаты измерительного контроля // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 5-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. 2018. Т. 2. С. 236—238.

3. *Шулепов А. В., Пьей Сони Вин.* Исследование погрешности измерения геометрических параметров деталей в зависимости от цвета покрытия поверхности в лазерных сканирующих оптоэлектронных измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 1(27). С. 55—62. DOI: 10.21685/2307-5538-2019-1-8.

4. *Секацкий В. С., Пикалов Ю. А., Строк Л. В.* Аэростатические опоры в координатно-измерительных машинах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 5. С. 26—36. DOI: 10.25791/pribor.05.2020.1176.

5. А.с. 636427 СССР, F 16 C31/06. Газостатический подшипник / *В. А. Коднянко, Ю. А. Пикалов, А. С. Тюриков, С. Н. Шатохин*. Заявл. 11.03.1977; опубл. 1978. Бюл. № 45.

6. *Kodnyanko V. A., Shatokhin S. N.* Theoretical Study on Dynamics Quality of Aerostatic Thrust Bearing with External Combined Throttling // FME Transactions. 2020. Vol. 46, N 4. P. 342—350. DOI: 10.5937/fme2002342K.

7. *Коднянко В. А., Пикалов Ю. А., Тюриков А. С., Шатохин С. Н.* Исследование газостатических опор с двойным дросселированием газа // Опоры скольжения с внешним источником давления. Красноярск, 1977. Вып. 2. С. 115—118.

8. *Коднянко В. А., Шатохин С. Н.* Исследование динамики газостатической опоры с двойным дросселированием газа в магистрали нагнетания // Машиноведение. 1978. № 6. С. 21—23.

9. *Kodnyanko V., Shatokhin S., Kurzakov A., Pikalov Y., Strok L., Pikalov I., Grigorieva O., Brungardt M.* Theoretical Efficiency Study of Output Lubricant Flow Rate Regulating Principle on the Example of a Two-Row Aerostatic Journal Bearing with Longitudinal Microgrooves and a System of External Combined Throttling // Mathematics. 2021. N 9. P. 1698. DOI: 10.3390/math9141698.

10. *Шатохин С. Н., Коднянко В. А.* О возможностях внешнего двойного дросселирования при проектировании газостатических опор // Тез. докл. Всесоюз. координационного совещания „Исследование и применение опор скольжения с газовой смазкой“. Винница, 1983. С. 134—135.

11. *Коднянко В. А.* Исследование газостатических опор с двойным дросселированием и активной компенсацией расхода газа: Дис. … канд. техн. наук. М.: ИМАШ, 1983. 201 с.

12. *Коднянко В. А., Григорьева О. А., Строк Л. В.* Исследование освой газостатической опоры с регулятором расхода типа сопло-заслонка // Журн. передовых исследований в области естествознания. 2021. № 13. С. 18—23. DOI: 10.26160/2572-4347-2021-13-18-23.

13. *Волков Е. А.* Численные методы. М.: Наука, 1987. 248 с.

Сведения об авторах

Лилия Владимировна Строк — аспирант; Политехнический институт Сибирского федерального университета, кафедра стандартизации, метрологии и управления качеством; E-mail: klw111@mail.ru

Владимир Александрович Коднянко — д-р техн. наук, профессор; Политехнический институт Сибирского федерального университета, кафедра стандартизации, метрологии и управления качеством; E-mail: kowlad@rambler.ru

Виктор Степанович Секацкий — канд. техн. наук, доцент; Политехнический институт Сибирского федерального университета, кафедра стандартизации, метрологии и управления качеством; E-mail: sekackiy@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.03.22; одобрена после рецензирования 07.04.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Chigrik N.N. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2014, no. 2(130), pp. 86–92. (in Russ.)
2. Sidenko O.E. *Kachestvo produktsii: kontrol', upravleniye, povysheniye, planirovaniye* (Product Quality: Control, Management, Improvement, Planning), Collection of Scientific Papers of the 5th International Youth Scientific and Practical Conference, 2018, vol. 2, pp. 236–238. (in Russ.)
3. Shulepov A.V., P'yey Soni Vin, *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2019, no. 1(27), pp. 55–62, DOI: 10.21685/2307-5538-2019-1-8. (in Russ.)

4. Strok L.V., Sekatsky V.S., Pikalov Yu.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 5, pp. 26–36, DOI: 10.25791/pribor.05.2020.1176. (in Russ.)
5. Certificate of authorship 636427 USSR, F 16 C31/06, *Gazostaticheskiy podshipnik* (Gasostatic Bearing), V.A. Kodnyanko, Yu.A. Pikalov, A.S. Tyurikov, S.N. Shatokhin, Priority 11.03.1977, Published 1978, Bulletin 45. (in Russ.)
6. Kodnyanko V.A., Shatokhin S.N. *FME Transactions*, 2020, no. 4(46), pp. 342–50, DOI: 10.5937/fme2002342K.
7. Kodnyanko V.A., Pikalov Yu.A., Tyurikov A.S., Shatokhin S.N. *Collection "Sliding bearings with an external pressure source*", Krasnoyarsk, 1977, no. 2, pp. 115–118. (in Russ.)
8. Kodnyanko V.A., Shatokhin S.N. *Issledovaniye dinamiki gazostaticheskoy opory s dvoynym drosselirovaniyem gaza v magistrali nagnetaniya* (Investigation of the Dynamics of a Gas-Static Support with Double Gas Throttling in the Injection Line), Moscow, 1978, no. 6, pp. 21–23. (in Russ.)
9. Kodnyanko V., Shatokhin S., Kurzakov A., Pikalov Y., Strok L., Pikalov I., Grigorieva O., Brungardt M. *Mathematics*, 2021, no. 9, pp. 1698, DOI: 10.3390/math9141698.
10. Shatokhin S.N., Kodnyanko V.A. *Tezisy doklada Vsesoyuznogo koordinatsionnogo soveshchaniya "Issledovaniye i primeneniye opor skol'zheniya s gazovoy smazkoy"* (Abstracts of the report of the All-Union Coordination Conference "Research and Application of Sliding Bearings with Gas Lubrication"), Vinnitsa, 1983, pp. 134–135. (in Russ.)
11. Kodnyanko V.A. *Issledovaniye gazostaticheskikh opor s dvoynym drosselirovaniyem i aktivnoy kompensatsiyey raskhoda gaza* (Study of Gas Static Supports with Double Throttling and Active Gas Flow Compensation), Candidate's thesis, Moscow, 1983, 201 p. (in Russ.)
12. Kodnyanko V.A., Grigoryeva O.A., Strok L.V. *Journal of Advanced Research in Natural Science*, 2021, no. 13, pp. 18–23, DOI: 10.26160/2572-4347-2021-13-18-23 (in Russ.)
13. Volkov E.A. *Chislennyye metody* (Numerical Methods), Moscow, 1987, 248 p. (in Russ.)

Data on authors

Lilia V. Strok — Post-Graduate Student; Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Department of Standardization, Metrology and Quality Management; E-mail: klw111@mail.ru

Vladimir A. Kodnyanko — Dr. Sci., Professor; Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Department of Standardization, Metrology and Quality Management; E-mail: kowlad@rambler.ru

Viktor S. Sekatsky — PhD, Associate Professor; Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, Department of Standardization, Metrology and Quality Management; E-mail: sekackiy@rambler.ru

Received 18.03.22; approved after reviewing 07.04.22; accepted for publication 25.04.22.

УДК 69.059.2;539.421;517.953;517.97
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-451-456

РАСЧЕТ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В. Л. Ткалич[1], М. Е. Калинкина[*1], А. Г. Коробейников[1,2], О. И. Пирожникова[1]

[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[*] *mariia_kalinkina@mail.ru*

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

Аннотация. Представлен подход к решению задач теории трещин, относящихся к так называемым „экстремальным задачам механики“. Рассмотрена задача „хрупкого разрушения“ для плоского элемента при наличии в нем прямоугольной трещины. Анализ динамики изменения трещины проведен на базе математической модели в частных производных. При расчете были заданы конкретные параметры материала, в частности алюминия, для упругого элемента и нагрузки. Полученные результаты позволили сделать вывод о значимости геометрического расположения упругих элементов в металлических изделиях объектов мониторинга транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: *оценка технического состояния, металлические конструкции, дефектоскопия, липшицевы границы, теория энергии формоизменения*

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-5323.2022.4.

Ссылка для цитирования: *Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И.* Расчет трещин в металлических конструкциях объектов транспортной инфраструктуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 451—456. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-451-456.

CALCULATION OF CRACKS IN METAL STRUCTURES OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES

V. L. Tkalich[1], M. E. Kalinkina[*1], A. G. Korobeynikov[1,2], O. I. Pirozhnikova[1]

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

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

Abstract. An actual approach to solving problems of the theory of cracks related to the so-called “extremal problems of mechanics” is presented. The problem of “brittle fracture” for a flat element in the presence of a rectangular crack in it, is considered. An analysis of the fracture change dynamics is carried out based on a mathematical model in partial derivatives. The calculations are performed with specific parameters of the material, in particular aluminum, of the elastic element and the load. The obtained results lead to conclusion on importance of geometric arrangement of the elastic elements in metal products of objects of transport infrastructure monitoring.

Keywords: assessment of technical condition, metal structures, flaw detection, Lipschitz boundaries, theory of energy of shape change

Acknowledments: The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MK-5323.2022.4.

For citation: Tkalich V. L., Kalinkina M. E., Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I. Calculation of cracks in metal structures of transport infrastructure facilities. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 6. P. 451—456 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-451-456.

© Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И., 2022

Введение. Задача выявления трещин в металлических конструкциях и их элементах, используемых на объектах транспортной инфраструктуры, не только актуальна, но и требует дальнейшего развития эффективных методов неразрушающей дефектоскопии [1].

В ходе исследований проанализированы теоретические основы дефектообразования на примере ряда задач теории трещин [2—4], а также создана математическая модель (ММ) равновесия упругих тел при наличии трещин и проведены вычислительные эксперименты.

Постановка задачи равновесия упругих тел при наличии трещин. Рассмотрим постановку задачи обеспечения равновесия упругих тел при наличии трещин [5]. При соответствующей формулировке этой задачи можно выявлять критические значения параметров роста трещин в хрупких материалах, для которых имеет место процесс разрушения образца.

Выполним постановку задачи для хрупкого разрушения плоского элемента при наличии в нем прямоугольной трещины. Пусть имеется область $D \in R^2$ с липшицевой границей L. Далее предположим, что кривая γ делит область D на две подобласти D_1 и D_2, которые также имеют липшицевы границы ∂D_1 и ∂D_2, причем мера $meas\left(L \cap \partial D_1\right) > 0$ и $meas\left(L \cap \partial D_2\right) > 0$. Кроме того, кривая γ не выходит за границы области, то есть $\gamma \cap L = \varnothing$. В этом случае γ описывает границы трещины. Введем в рассмотрение нормаль $\upsilon = \left(\upsilon_1, \upsilon_2\right)$ к кривой γ. Формулировка задачи о равновесии двумерного упругого тела при наличии трещины может выглядеть следующим образом. В области D / γ найти вектор перемещений $V\left(u, v\right)$ и тензор напряжений $\sigma = \left\{\sigma_{ij}\right\}$, $i, j = 1, 2$, такие, чтоб соблюдались следующие условия:

1) $-div\sigma = F$,

2) $\sigma - A\varepsilon\left(V\right) = 0$,

3) на липшицевой границе $V = 0$.

Здесь $F\left(F_x, F_y\right) \in L^2\left(D\right)$ — заданный вектор внешних поверхностных сил; $\xi\left(V\right) = \left\{\xi_{ij}\left(V\right)\right\}$ — тензор малых деформаций; $A = \left\{a_{ijkl}\right\}, i, j, k, l = 1, 2$ — тензор, обладающий свойствами симметрии и положительной определенности:

$$a_{ijkl} = a_{jikl} = a_{klij}, a_{ijkl} \in L^{\infty}\left(D\right),\ a_{ijkl}\xi_{kl}\xi_{ij} \geq c_0\left|\xi\right|^2\ \ \forall \xi_{ij} = \xi_{ji}, c_0 = \text{const} \geq 0.$$

В дальнейшем будем считать, что $a_{ijkl} = \text{const},\ \ i, j, k, l = 1, 2.$

В основу поиска решения положим справедливость гипотезы о прямолинейном распространении трещин в ходе нагружения элемента. Это возможно при наличии симметрии образца, а также приложенных сил на D / γ, относительно трещины длиной l. При этом считаем, что силы не прикладываются непосредственно к зоне возникновения трещины. Это позволяет считать, что в этой зоне выполняется равенство $F_x = F_y = 0$. В такой дифференциальной постановке условие 1) описывается уравнением равновесия, 2) — линейным законом Гука, 3) — условие закрепления элемента на границе.

Результаты вычислительных экспериментов. В ходе исследований в среде MATLAB R2021b, которая позволяет решать задачи в различных предметных областях [6—11], реализована ММ равновесия упругих тел при наличии трещин.

При моделировании были заданы параметры, представленные в таблице, о ширине и высоте пластины, начальном размере трещины, приложенной нагрузке, коэффициенте интенсивности напряжений, углах, под которым расположена трещина (для расчета разных вариантов).

Параметр		**Значение**	**Представление величины в СИ**
Полуширина пластины, b		50 мм	0,05 м
Полувысота пластины, h_0		1,25b	0,0625 м
Полудлина пластины, a		0,5b	0,025 м
Давление, load		100 МПа	10^8 Па
Коэффициент интенсивности воздействия, K_0		load/1[Н/м^2]·sqrt(p_i·a/1[м])	$2{,}8025 \cdot 10^7$
Расположение трещины, угол	β	120°	2,0944 рад
	β_0	45°	0,7854 рад
	β_1	15,5°	0,27053 рад
	β_2	100°	1,7453 рад

Ниже представлены данные о свойствах упругого элемента:

— плотность — 8000 кг/м^3;

— модуль Юнга — 190 ГПа;

— коэффициент Пуассона — 0,45.

На рис. 1 приведена начальная геометрия для расчета трещины под углом к длинной стороне пластины в 15,5°.

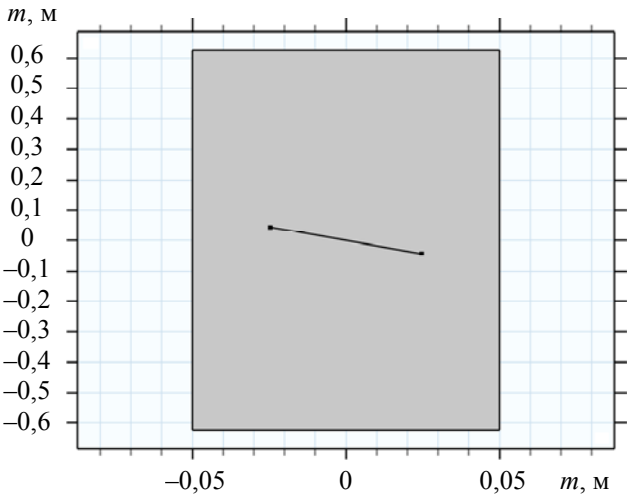


Рис. 1

На рис. 2 представлена расчетная сетка, полученная согласно условиям 1)—3), с трещиной под углом в 15,5°.

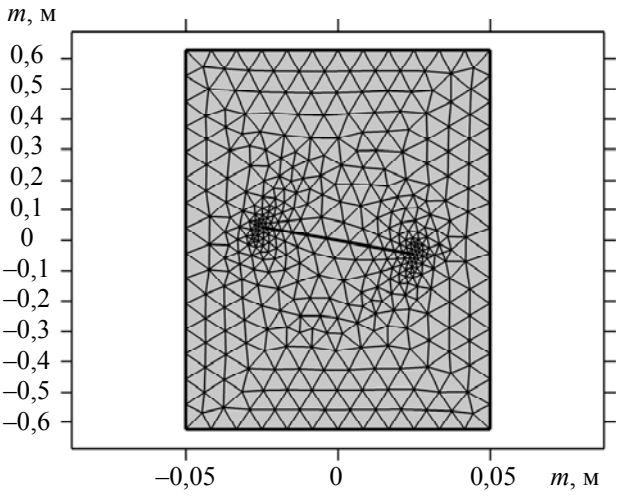


Рис. 2

На рис. 3 и 4 представлены результаты компьютерного моделирования для напряжений по Мизесу (в русскоязычной литературе — интенсивности напряжений).

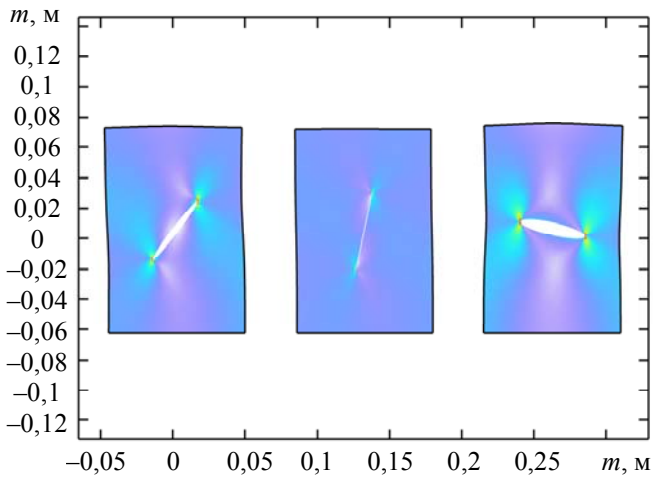


Рис. 3

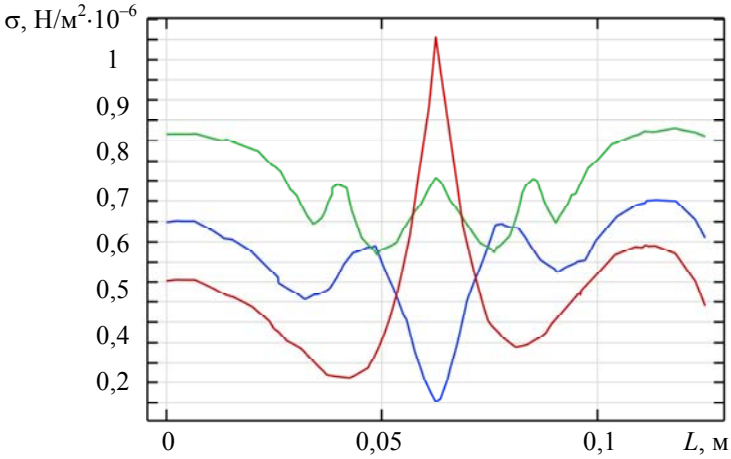


Рис. 4

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования динамики трещин — расширения, смещения раскрытия (s — ширина раскрытия трещины), расположенных изначально под разными углами.

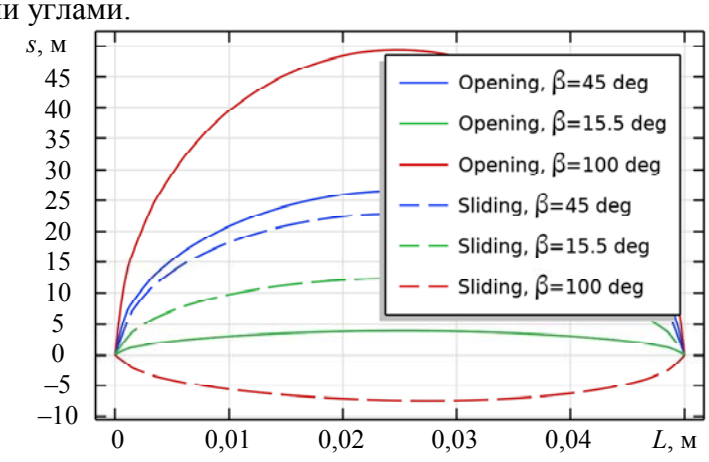


Рис. 5

Заключение. Анализ результатов компьютерного моделирования показывает, что изначальное физическое расположение трещин играет большую роль. Поэтому элементы, в которых при помощи каких-либо методов дефектоскопии обнаружены зоны с наличием трещин, необходимо устанавливать соответствующим образом. Это позволит продлевать срок службы упругих элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BSI. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. British Standards Institute, Tech. Rep. BS 7910:2013+A1:2015, 2015 [Электронный ресурс]: <doi.org/10.3403/30241230>.

2. *Лурье А. И.* Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.

3. *Newman J. C. and Raju I. S.* An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack // Engineering Fracture Mechanics. 1981. Vol. 15, N 1. P. 185—192 [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1016/0013-7944(81)90116-8>.

4. *Bowness D. and Lee M. M. K.* Prediction of weld toe magnification factors for semi-elliptical cracks in Tbutt joints // Intern. J. of Fatigue. 2000. Vol. 22, N 5. P. 369—387 [Электронный ресурс]: < https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00012-8>.

5. *Морозов Н. Ф.* Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984.

6. *Korobeynikov A. G., Fedosovsky M. E., Maltseva N. K., Baranova O. V., Zharinov I. O., Gurjanov A. V., Zharinov O. O.* Use of information technologies in design and production activities of instrument-making plants // Indian J. of Science and Technology. 2016. Vol. 9, N 44. P. 104708.

7. *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.

8. *Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г.* Средства интероперабельности в распределенных геоинформационных системах // Журнал Радиоэлектроники. 2015. № 3 [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/download/elibrary_23327290_33687569.pdf>.

9. *Богатырев В. А, Богатырев С. В*. Своевременность обслуживания в многоуровневых кластерных системах с поэтапным уничтожением просроченных запросов // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2018. № 2(164). С. 28—35.

10. *Мунтян Е. Р*. Использование нечетких GH-моделей для представления сложных технических систем // Информатизация и связь. 2021. № 3. С. 55—60. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-55-60.

11. *Колоденкова А. Е., Верещагина С. С., Мунтян Е. Р.* Разработка единой интеллектуальной системы поддержки принятия решений для диагностирования электротехнического оборудования промышленности // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. СПб: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 1874—1878. DOI: 10.25728/vspu.2019.1874.

Сведения об авторах

Вера Леонидовна Ткалич — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

Мария Евгеньевна Калинкина — магистрант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru

Анатолий Григорьевич Коробейников — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова; E-mail: Korobeynikov_A_G @mail.ru

Ольга Игоревна Пирожникова — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: cheesecake@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.22; одобрена после рецензирования 22.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. *BSI, Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*, British Standards Institute, Tech. Rep. BS 7910:2013+A1:2015, 2015, https://doi.org/10.3403/30241230.
2. Lurie A.I. *Teoriya uprugosti* (Theory of Elasticity), Moscow, 1970, 940 p. (in Russ.)
3. Newman J.C. and Raju I.S. *Engineering Fracture Mechanics*, 1981, no. 1(15), pp. 185–192, https://doi.org/10.1016/0013-7944(81)90116-8.
4. Bowness D. and Lee M.M.K. *International Journal of Fatigue*, 2000, no. 5(22), pp. 369–387, https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00012-8.

5. Morozov N.F. *Matematicheskiye voprosy teorii treshchin* (Mathematical Problems of the Theory of Cracks), Moscow, 1984. (in Russ.)
6. Korobeynikov A.G., Fedosovsky M.E., Maltseva N.K., Baranova O.V., Zharinov I.O., Gurjanov A.V., Zharinov O.O. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, no. 44(9), pp. 104708.
7. 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.
8. Grishentcev A.U., Korobeynikov A.G. *Zhurnal Radioelektroniki* (Journal of Radio Electronics), 2015, no. 3, https://elibrary.ru/download/elibrary_23327290_33687569.pdf.
9. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* (Herald of Computer and Information Technologies), 2018, no. 2(164), pp. 28–35. (in Russ.)
10. Muntyan E.R. *Informatizatsiya i svyaz*', 2021, no. 3, pp. 55–60, DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-55-60.(in Russ.)
11. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Muntyan E.R. *Sbornik trudov XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019* (Proceedings of the XIII All-Russian Conference on Management Problems of the VSPU-2019), 2019, pp. 1874–1878, DOI: 10.25728/vspu.2019.1874. (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

Maria E. Kalinkina — M. Sc.; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; 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; E-mail: Korobeynikov_A_G @mail.ru

Olga I. Pirozhnikova — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: cheesecake@mail.ru

Received 02.03.22; approved after reviewing 22.03.22; accepted for publication 25.04.22.