

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

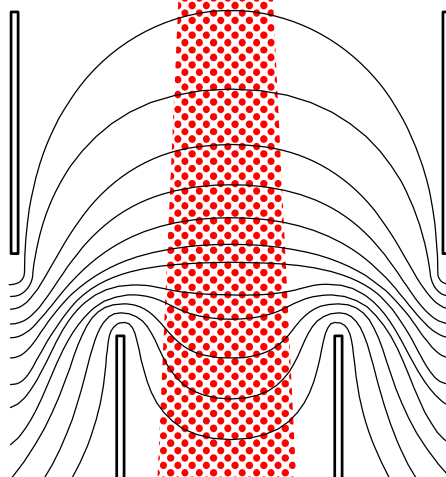
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПРИБОРО**С**ТРОЕНИЕ
НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **3**
Т. 66
2023

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



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*д-р техн. наук, проф. А. А. БОБЦОВ,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *И. М. Игошина*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

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

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

Подписано в печать 31.03.2023 г.

*Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А
Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru*

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Рукопись должна содержать:

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

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

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

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

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

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

Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Арсеньев В. Н., Слатов С. В., Ядренкин А. А. Обработка разнородных данных о характеристиках системы управления летательного аппарата при испытаниях опытных образцов175
- Коновалов А. М., Коршунов А. И. Выбор дискретного квадратичного показателя качества при расчете цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса при заданном порядке астатизма183
- Поляков В. И., Зиннатулин Ф. Ф. Модели вычислительных процессов информационной системы.....195
- Шилин А. Н., Рошин Д. А. Применение частотного метода обработки изображения для повышения точности определения параметров визирной цели200

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

- Ларкин Е. В., Титов Д. В., Акименко Т. А., Шибакина Т. А. Тестирование ИК-сенсоров с использованием генератора эталонных тепловых сигналов.....210
- Лютикова М. Н., Ридель А. В. Модификация влагомера для усовершенствования электрохимического метода определения содержания воды в трансформаторном масле223
- Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических свойств авиационных технических моющих жидкостей в ультрафиолетовом диапазоне длин волн234

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Лопатов М. Г., Чукичев А. В., Тимофеева О. С. Методика проектирования формообразующих деталей литейных форм с использованием информационных технологий.....241

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Марусина М. Я., Бурдаев И. В. Автоматическое распознавание зрительных стимулов по единичным вызванным потенциалам на электроэнцефалограмме247
- Медунецкий В. М., Солк С. В., Лебедев О. А. Центрирование линз с асферическими поверхностями при их формообразовании на станке алмазного микроточения ..251

EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

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

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@itmo.ru

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 66

MARCH 2023

№ 3

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Arseniev V. N., Slatov S. V., Yadrenkin A. A.** Processing of Heterogeneous Data on the Aircraft Control System Characteristics During Its Prototypes Testing.....175
- Konovalov A. M., Korshunov A. I.** Selection of a Discrete Quadratic Quality Index when Calculating a Digital Tracking System with a Finite Decay Time of a Free Process at a Given Astatism Order183
- Polyakov V. I., Zinnatulin F. F.** Models of Computing Processes of an Information System195
- Shilin A. N., Roshchin D. A.** Application of the Frequency Method of Image Processing to Improve the Accuracy of Determining Sighting Target Parameters.....200

INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING

THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

- Larkin E. V., Titov D. V., Akimenko T. A., Shirabakina T. A.** Testing of IR Sensors Using a Reference Thermal Signal Generator210
- Lyutikova M. N., Ridel A. V.** Modification of the Moisture Meter to Improve the Electrochemical Method for Determining the Water Content in Transformer Oil223
- Maierov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A.** Investigation of Optical Properties of Aviation Technical Washing Liquids in the Ultraviolet Wavelength Range234

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Lopatov M. G., Chukichev A.V., Timofeeva O. S.** Methodology for Designing Forming Parts of Injection Molds Using Information Technologies241

BRIEF NOTES

- Marusina M. Ya., Burdaev I. V.** Automatic Recognition of Visual Stimules by Single Evoked Potentials on an Electroencephalogram247
- Medunetsky V. M., Solk S. V., Lebedev O. A.** Centering Lenses with Aspherical Surfaces During Their Shaping on a Diamond Micro-Turning Machine.....251

To the Authors!

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

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

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

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

Submission includes two copies of:

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

— extended abstract (150—250 words);

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

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

— the recommendation of the Department (laboratory);

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

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

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

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

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

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

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

Editorial Staff

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

УДК 519.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-175-182

ОБРАБОТКА РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

В. Н. АРСЕНЬЕВ, С. В. СЛАТОВ*, А. А. ЯДРЕНКИН

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

Аннотация. В процессе опытной отработки создаваемого летательного аппарата невозможно получить однородные данные о характеристиках его системы управления вследствие различия условий испытаний отдельных образцов. Для повышения качества оценивания характеристик результаты испытаний пересчитываются к некоторым заданным условиям. Предлагаются два способа определения операторов пересчета, позволяющие повысить точность оценивания характеристик системы управления. Приведен демонстрационный пример.

Ключевые слова: летательный аппарат, система управления, характеристики, разнородные данные

Ссылка для цитирования: Арсеньев В. Н., Слатов С. В., Ядренкин А. А. Обработка разнородных данных о характеристиках системы управления летательного аппарата при испытаниях опытных образцов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 175—182. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-175-182.

PROCESSING OF HETEROGENEOUS DATA ON THE AIRCRAFT CONTROL SYSTEM CHARACTERISTICS DURING ITS PROTOTYPES TESTING

V. N. Arseniev, S. V. Slatov*, A. A. Yadrenkin

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

Abstract. In the process of experimental testing of an aircraft being created, it is impossible to obtain homogeneous data on its control system characteristics, due to differences in test conditions for individual samples. To improve the quality of the characteristics assessment, the test results are recalculated to some preset conditions. Two methods are proposed for determining recalculation operators, which make it possible to improve the accuracy of estimating the control system characteristics. A demo example is provided.

Keywords: aircraft, control system, characteristics, heterogeneous data

For citation: Arseniev V. N., Slatov S. V., Yadrenkin A. A. Processing of heterogeneous data on the aircraft control system characteristics during its prototypes testing. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 175—182 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-175-182.

Введение. Основной задачей опытной отработки создаваемого летательного аппарата (ЛА) является проверка соответствия характеристик его системы управления (СУ) заданным требованиям [1]. Высокая стоимость опытных образцов ЛА, а также большие затраты на организацию и проведение испытаний не позволяют провести опытную отработку в необходимом объеме. Кроме того, при проведении испытаний опытных образцов ЛА, как правило, нарушается один из базовых принципов статистического оценивания — принцип однородности

испытаний. Это связано с тем, что в процессе опытной отработки изменяются условия проведения испытаний опытных образцов вследствие доработки составных частей СУ, уточнения алгоритмов управления и других причин. Полученные таким образом данные являются разнородными и характеризуют различные генеральные совокупности [1—3]. Для их совместной обработки и принятия обоснованных решений о характеристиках СУ необходимо результаты испытаний привести к некоторым единым условиям [4, 5] (ГОСТ Р 55798-2013 (ИСО 2314:2009)).

Одно из важнейших свойств СУ — точность, которая в ряде случаев характеризуется отклонениями фазовых координат ЛА от расчетных значений в заданных точках траектории движения. Поскольку отклонения в основном вызваны влиянием внутренних и внешних случайных факторов на движение ЛА, то они являются случайными величинами и характеризуются математическим ожиданием и корреляционной матрицей. Последние часто называют точностными характеристиками (ТХ) СУ [6]. Их оценки могут быть получены путем моделирования возмущенного движения ЛА для любых условий, характеризующих испытания опытных образцов [7], и в дальнейшем использованы для определения операторов пересчета опытных данных к единым условиям. Задача формулируется следующим образом.

Постановка задачи. Имеются модельные оценки $\mathbf{M}_{M1}$, $\mathbf{M}_{M2}$ и $\mathbf{K}_{M1}$, $\mathbf{K}_{M2}$ математического ожидания и корреляционной матрицы n -мерного вектора отклонений фазовых координат СУ ЛА $\hat{\mathbf{X}}_{1,2} = \hat{\mathbf{X}}(t_{1,2})$ в фиксированные моменты времени $t_{1,2}$ в условиях испытаний 1 и 2 (знак „ $\hat{}$ “ используется для отличия случайной величины от детерминированной).

Результаты испытаний опытных образцов представлены выборками $\mathbf{X}_{1i}, i = \overline{1, N_1}$, и $\mathbf{X}_{2i}, i = \overline{1, N_2}$, где $N_{1,2}$ — число опытных образцов ЛА, испытанных в условиях 1 и 2.

Необходимо найти:

- оператор $\mathbf{P}_{12}$ пересчета результатов испытаний опытных образцов во вторых условиях к результатам испытаний в первых условиях;
- опытные оценки $\mathbf{M}_{O12}$ и $\mathbf{K}_{O12}$ точностных характеристик СУ в первых условиях, учитывающие результаты испытаний в первых и вторых условиях.

Анализ подходов к определению оператора пересчета. Полагается, что векторы $\hat{\mathbf{X}}_1$ и $\hat{\mathbf{X}}_2$ отклонений фазовых координат СУ ЛА от расчетных значений в первых и вторых условиях испытаний связаны линейной зависимостью [8]

$$\hat{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{P}_{12} \hat{\mathbf{X}}_2. \quad (1)$$

Тогда должны выполняться уравнения

$$\mathbf{M}_{M1} = \mathbf{P}_{12} \mathbf{M}_{M2}; \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_{M1} = \mathbf{P}_{12} \mathbf{K}_{M2} \mathbf{P}_{12}^T, \quad (3)$$

где индекс „Т“ обозначает операцию транспонирования матрицы.

В качестве оператора пересчета проф. В. И. Мироновым было предложено использовать решение нелинейного матричного уравнения (3), полученное им с помощью ортогональных преобразований матриц $\mathbf{K}_{M1}$ и $\mathbf{K}_{M2}$ [9]. Такой подход имеет два основных недостатка. Во-первых, не учитывается условие (2), которому должен удовлетворять оператор пересчета. Во-вторых, уравнение (3) имеет множество решений, среди которых может оказаться матрица $\mathbf{P}_{12}$, дающая приемлемое по точности решение уравнения (2) при небольших отклонениях взаимозависимости векторов $\hat{\mathbf{X}}_1$ и $\hat{\mathbf{X}}_2$ от линейной.

Другое предложение проф. В. И. Миронова состоит в линеаризации уравнений возмущенного движения ЛА и использовании коэффициентов чувствительности и аппарата обобщенного обращения матриц [9]. Такое решение не получило широкого распространения, главным образом, из-за невысокой точности решения уравнения (3).

В ЦНИИ ВКС МО РФ им. М. К. Тихонравова (г. Королёв, Московская обл.) были разработаны новые подходы к определению матриц пересчета, основанные на использовании неортогональных преобразований, предположении об отсутствии корреляционных связей между элементами вектора вариаций фазовых координат СУ и выборе оператора приведения в виде диагональной матрицы. Широкого практического применения эти методы также не нашли.

Перспективным представлялся метод, связанный с решением нелинейного векторно-матричного уравнения правдоподобия [10]. Однако полученное точное решение этого уравнения не всегда обеспечивает приемлемую точность решения уравнения (2) или (3).

Попытка определения оператора пересчета с использованием в уравнении (2) оценок математических ожиданий, полученных по ограниченному опытному данным, не привела к сколько-нибудь значительным результатам [11].

В связи с вышеизложенным предлагаются два способа решения первой части поставленной задачи. Операторы пересчета, полученные первым и вторым способами, будем обозначать $\mathbf{P}_{П12}$ и $\mathbf{P}_{В12}$ соответственно.

Как и ранее [11], в качестве показателей точности решения уравнений (2), (3) рассматриваются величины относительных погрешностей

$$\delta_M = \frac{\|\mathbf{M}_{M1} - \mathbf{P}_{12}\mathbf{M}_{M2}\|}{\|\mathbf{M}_{M1}\|} 100 \%, \quad \delta_K = \frac{\|\mathbf{K}_{M1} - \mathbf{P}_{12}\mathbf{K}_{M2}\mathbf{P}_{12}^T\|}{\|\mathbf{K}_{M1}\|} 100 \%,$$

где $\|\cdot\|$ — евклидова норма, или норма Фробениуса [12].

Первый способ определения оператора пересчета. С помощью известных преобразований [4] уравнения (2), (3) могут быть представлены в виде

$$\boldsymbol{\mu}_1 = \mathbf{Q}\boldsymbol{\mu}_2; \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T = \mathbf{I}, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\mu}_i = \mathbf{D}_i^{-1/2}\mathbf{S}_i^T\mathbf{M}_{Mi}$; $\mathbf{Q} = \mathbf{D}_1^{-1/2}\mathbf{S}_1^T\mathbf{P}_{12}\mathbf{S}_2\mathbf{D}_2^{1/2}$ — ортогональная матрица; $\mathbf{S}_i\mathbf{D}_i\mathbf{S}_i^T = \mathbf{K}_{Mi}$; $\mathbf{S}_i$ и $\mathbf{D}_i$ — ортогональная и диагональная матрицы, состоящие из собственных векторов и собственных значений матрицы $\mathbf{K}_{Mi}$ соответственно, $i=1, 2$; $\mathbf{I}$ — единичная $n \times n$ -матрица.

Рассмотрим уравнение (4). Входящие в него векторы $\boldsymbol{\mu}_1$ и $\boldsymbol{\mu}_2$ с помощью QR-разложения [14] можно представить следующим образом:

$$\boldsymbol{\mu}_i = \mathbf{S}_{\mu_i}\mathbf{T}_{\mu_i},$$

где $\mathbf{S}_{\mu_i}$ — ортогональная матрица; $\mathbf{T}_{\mu_i} = \begin{bmatrix} t_i & \mathbf{0}^T \end{bmatrix}^T$ — вектор-столбец, только первый элемент которого отличается от нуля; $\mathbf{0}^T$ — вектор-строка размерности $1 \times (n-1)$; $i=1, 2$.

Подстановка $\boldsymbol{\mu}_1$ и $\boldsymbol{\mu}_2$ в формулу (4) дает уравнение $\mathbf{T}_{\mu_1} = \mathbf{S}_{\mu_1}^T\mathbf{Q}\mathbf{S}_{\mu_2}\mathbf{T}_{\mu_2}$ или, после введения обозначения $\tilde{\mathbf{Q}} = \mathbf{S}_{\mu_1}^T\mathbf{Q}\mathbf{S}_{\mu_2}$, уравнение

$$\mathbf{T}_{\mu_1} = \tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{T}_{\mu_2}. \quad (6)$$

Ортогональную матрицу $\tilde{\mathbf{Q}}$ можно представить в виде

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} q_{11} & \mathbf{q}_{12}^T \\ \mathbf{q}_{21} & \mathbf{q}_{22} \end{bmatrix},$$

где q_{11} — скалярная величина; $\mathbf{q}_{21}$ и $\mathbf{q}_{12}$ — вектор-столбцы размерности $(n-1) \times 1$; $\mathbf{q}_{22}$ — $(n-1) \times (n-1)$ -матрица.

Тогда уравнение (6) примет вид

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & \mathbf{q}_{12}^T \\ \mathbf{q}_{21} & \mathbf{q}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} t_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11}t_2 + \mathbf{q}_{12}^T \mathbf{0} \\ \mathbf{q}_{21}t_2 + \mathbf{q}_{22} \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

Если положить $q_{11} = t_1/t_2$, $\mathbf{q}_{21} = \mathbf{0}$, то матрица $\tilde{\mathbf{Q}}$ обеспечит точное решение уравнения (4), а соответствующая ей матрица $\mathbf{P}_{\Pi 12} = \mathbf{S}_1 \mathbf{D}_1^{1/2} \mathbf{S}_{\mu_1} \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{S}_{\mu_2}^T \mathbf{D}_2^{-1/2} \mathbf{S}_2^T$ — точное решение уравнения (2). Обозначив $\mathbf{R}_1 = \mathbf{S}_1 \mathbf{D}_1^{1/2}$ ($\mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^T = \mathbf{K}_{M1}$) и $\mathbf{R}_2 = \mathbf{S}_2 \mathbf{D}_2^{1/2}$ ($\mathbf{R}_2 \mathbf{R}_2^T = \mathbf{K}_{M2}$), матрицу пересчета можно представить в виде

$$\mathbf{P}_{\Pi 12} = \mathbf{R}_1 \mathbf{S}_{\mu_1} \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{S}_{\mu_2}^T \mathbf{R}_2^{-1}. \quad (7)$$

С другой стороны, матрица $\tilde{\mathbf{Q}}$ должна удовлетворять уравнению $\tilde{\mathbf{Q}} \tilde{\mathbf{Q}}^T = \mathbf{I}$, которое в соответствии с принятыми выше обозначениями можно представить следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{Q}} \tilde{\mathbf{Q}}^T = \begin{bmatrix} q_{11} & \mathbf{q}_{12}^T \\ \mathbf{q}_{21} & \mathbf{q}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{11} & \mathbf{q}_{21}^T \\ \mathbf{q}_{12} & \mathbf{q}_{22}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11}^2 + \mathbf{q}_{12}^T \mathbf{q}_{12} & q_{11} \mathbf{q}_{21}^T + \mathbf{q}_{12}^T \mathbf{q}_{22}^T \\ q_{11} \mathbf{q}_{21} + \mathbf{q}_{22} \mathbf{q}_{12} & \mathbf{q}_{21} \mathbf{q}_{21}^T + \mathbf{q}_{22} \mathbf{q}_{22}^T \end{bmatrix} = \mathbf{I}.$$

Полагая, как и в первом случае, что $\mathbf{q}_{21} = \mathbf{0}$, получаем

$$\begin{bmatrix} q_{11}^2 + \mathbf{q}_{12}^T \mathbf{q}_{12} & \mathbf{q}_{12}^T \mathbf{q}_{22}^T \\ \mathbf{q}_{22} \mathbf{q}_{12} & \mathbf{q}_{22} \mathbf{q}_{22}^T \end{bmatrix} = \mathbf{I}.$$

Из последнего уравнения видно, что оно преобразуется в тождество при выполнении следующих условий: $\mathbf{q}_{22}$ — любая ортогональная $(n-1) \times (n-1)$ -матрица; $\mathbf{q}_{12} = \mathbf{0}$; $q_{11}^2 = 1$. В этом случае матрица пересчета $\mathbf{P}_{\Pi 12}$, полученная по формуле (7), обеспечит точное решение уравнения (3).

При линейной зависимости между векторами $\hat{\mathbf{X}}_1$ и $\hat{\mathbf{X}}_2$ матрица $\mathbf{P}_{\Pi 12}$ дает точные решения обоих уравнений (2) и (3), поскольку в этом случае $t_1 = t_2$ и $q_{11} = 1$. При нелинейной зависимости, варьируя величину q_{11} в диапазоне от $\min\{t_1/t_2, \text{sgn}(t_1)\text{sgn}(t_2)\}$ до $\max\{t_1/t_2, \text{sgn}(t_1)\text{sgn}(t_2)\}$, можно изменять погрешности δ_M и δ_K .

Поскольку математические ожидания $\mathbf{M}_{M1}$ и $\mathbf{M}_{M2}$ характеризуют отклонения центров областей рассеяния фазовых координат СУ ЛА от расчетных значений и могут быть уменьшены путем выбора соответствующих алгоритмов управления, а корреляционные матрицы $\mathbf{K}_{M1}$ и $\mathbf{K}_{M2}$ — размеры этих областей, то требования к погрешности δ_K решения уравнения (3), как правило, более жесткие. Задавшись максимально допустимым значением $\delta_{K\text{доп}}$ погрешности δ_K , можно найти матрицу пересчета $\mathbf{P}_{\Pi 12}$, обеспечивающую выполнение условия $\delta_K \leq \delta_{K\text{доп}}$ и приемлемую точность решения уравнения (2).

Второй способ определения оператора пересчета. Как отмечалось выше, корреляционные матрицы $\mathbf{K}_{Mi}$, $i=1, 2$, могут быть представлены в виде $\mathbf{K}_{Mi} = \mathbf{S}_i \mathbf{D}_i \mathbf{S}_i^T$ или $\mathbf{K}_{Mi} = \mathbf{R}_{Mi} \mathbf{R}_{Mi}^T$, где $\mathbf{R}_{Mi} = \mathbf{S}_i \mathbf{D}_i^{1/2}$. Тогда одним из решений уравнения (3) будет матрица $\mathbf{R}_{M1} \mathbf{R}_{M2}^{-1}$.

Рассмотрим функционал

$$L = \text{tr} \left\{ \left(\mathbf{R}_{M1} - \mathbf{P}_{12} \mathbf{R}_{M2} \right) \left(\mathbf{R}_{M1} - \mathbf{P}_{12} \mathbf{R}_{M2} \right)^T \right\} + 2 \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{M}_1 - \mathbf{P}_{12} \mathbf{M}_2),$$

где $\text{tr}\{\cdot\}$ — функция определения следа матрицы [13]; $\boldsymbol{\lambda}$ — вектор, состоящий из неопределенных множителей Лагранжа [14].

Матрица пересчета должна обеспечить минимум этого функционала, т.е.

$$\mathbf{P}_{B12} = \arg \min_{\mathbf{P}_{12}} L.$$

Необходимые условия минимума L по матрице $\mathbf{P}_{12}$ и вектору $\boldsymbol{\lambda}$ имеют вид

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial L}{\partial \mathbf{P}_{12}} \right|_{\mathbf{P}_{12}=\mathbf{P}_{B12}} = 2 \mathbf{P}_{B12} \mathbf{R}_{M2} \mathbf{R}_{M2}^T - 2 \mathbf{R}_{M1} \mathbf{R}_{M2}^T - 2 \boldsymbol{\lambda} \mathbf{M}_2^T = 0; \\ \left. \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\lambda}} \right|_{\mathbf{P}_{12}=\mathbf{P}_{B12}} = 2 (\mathbf{M}_1 - \mathbf{P}_{B12} \mathbf{M}_2) = 0, \end{cases}$$

откуда получаются два уравнения

$$\mathbf{P}_{B12} = \mathbf{R}_{M1} \mathbf{R}_{M2}^{-1} + \boldsymbol{\lambda} \mathbf{M}_2^T \mathbf{K}_2^{-1}, \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_1 - \mathbf{P}_{B12} \mathbf{M}_2 = 0. \quad (9)$$

Подстановка матрицы $\mathbf{P}_{B12}$ в формулу (9) позволяет получить уравнение

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{R}_{M1} \mathbf{R}_{M2}^{-1} \mathbf{M}_2 + \boldsymbol{\lambda} \mathbf{M}_2^T \mathbf{K}_2^{-1} \mathbf{M}_2,$$

из которого определяется вектор $\boldsymbol{\lambda}$:

$$\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{M}_1 - \mathbf{R}_{M1} \mathbf{R}_{M2}^{-1} \mathbf{M}_2) / \mathbf{M}_2^T \mathbf{K}_2^{-1} \mathbf{M}_2.$$

Подставив его в правую часть выражения (8), получим формулу для вычисления оператора пересчета

$$\mathbf{P}_{B12} = \mathbf{R}_{M1} \mathbf{R}_{M2}^{-1} + \frac{1}{\mathbf{M}_2^T \mathbf{K}_2^{-1} \mathbf{M}_2} (\mathbf{M}_1 - \mathbf{R}_{M1} \mathbf{R}_{M2}^{-1} \mathbf{M}_2) \mathbf{M}_2^T \mathbf{K}_2^{-1}. \quad (10)$$

Легко убедиться в том, что полученная таким образом матрица $\mathbf{P}_{B12}$ при подстановке ее в уравнение (9) превращает последнее в тождество.

Определение оценок точностных характеристик СУ. Для определения опытных оценок $\mathbf{M}_{O12}$ и $\mathbf{K}_{O12}$ точностных характеристик СУ ЛА в первых условиях, учитывающих результаты испытаний опытных образцов в первых и вторых условиях, полагается, что выборки $\mathbf{X}_{1i}, i=1, N_1$, и $\mathbf{P}_{12} \mathbf{X}_{2i}, i=1, N_2$, принадлежат к одной генеральной совокупности. Тогда опытная оценка математического ожидания вектора отклонений фазовых координат ЛА от расчетных значений в первых условиях испытаний будет определяться по формуле

$$\mathbf{M}_{O12} = \frac{1}{N_1 + N_2} \left(\sum_{i=1}^{N_1} \mathbf{X}_{1i} + \mathbf{P}_{12} \sum_{i=1}^{N_2} \mathbf{X}_{2i} \right)$$

или, если ввести обозначения $\mathbf{M}_{Oi} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{X}_{ij}, i=1, 2$, — по формуле

$$\mathbf{M}_{O12} = \frac{1}{N_1 + N_2} (N_1 \mathbf{M}_{O1} + N_2 \mathbf{P}_{12} \mathbf{M}_{O2}). \quad (11)$$

Опытная оценка корреляционной матрицы вектора вариаций фазовых координат в первых условиях, учитывающая результаты всех испытаний ЛА, при сделанном выше предположении будет иметь вид

$$\mathbf{K}_{O12} = \frac{1}{N_1 + N_2} \left\{ \sum_{i=1}^{N_1} (\mathbf{X}_{1i} - \mathbf{M}_{O12})(\mathbf{X}_{1i} - \mathbf{M}_{O12})^T + \sum_{i=1}^{N_2} (\mathbf{P}_{12}\mathbf{X}_{2i} - \mathbf{M}_{O12})(\mathbf{P}_{12}\mathbf{X}_{2i} - \mathbf{M}_{O12})^T \right\}. \quad (12)$$

Аналогичным образом могут быть получены опытные оценки точностных характеристик СУ во вторых условиях, учитывающие результаты испытаний ЛА в первых условиях.

Как показано в [4], совместная обработка неоднородных данных путем пересчета их к единым условиям позволяет повысить качество оценивания характеристик СУ ЛА.

Пример. Рассматривается гипотетический летательный аппарат, предназначенный для перемещения некоторых грузов в заданные области околоземного космического пространства.

Размеры этих областей характеризуются трехмерным вектором $\hat{\mathbf{X}}$, состоящим из отклонений фазовых координат ЛА от расчетных значений в конечных точках траекторий движения ЛА. На этапах, предшествующих испытаниям опытных образцов ЛА, построены математические модели движения ЛА.

Методом статистических испытаний получены модельные оценки характеристик точности СУ для двух условий движения ЛА, отличающихся координатами конечной точки и массой перемещаемых грузов:

$$\mathbf{M}_{M1} = [25 \ 6 \ 37]^T; \mathbf{M}_{M2} = [24 \ 8 \ 12]^T;$$

$$\mathbf{K}_{M1} = \begin{bmatrix} 814081 & 561 & 1403298 \\ 561 & 1497 & 1031 \\ 1403298 & 1031 & 2428612 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{M2} = \begin{bmatrix} 776354 & 548556 & 547578 \\ 548556 & 388292 & 387339 \\ 547578 & 387339 & 387377 \end{bmatrix}.$$

Необходимо найти матрицы $\mathbf{P}_{12}$, связывающие векторы $\hat{\mathbf{X}}_1$ и $\hat{\mathbf{X}}_2$ в первых и вторых условиях.

Пусть наложено ограничение $\delta_K \leq 2\%$ на величину относительной погрешности решения нелинейного уравнения (3).

Оператор пересчета результатов испытаний ЛА во вторых условиях к результатам испытаний в первых условиях, полученный первым способом, имеет вид

$$\mathbf{P}_{П12} = \begin{bmatrix} -4,2764 & -16,5756 & 21,6864 \\ 0,3763 & -0,7629 & 0,2561 \\ -8,6128 & -28,9261 & 39,5930 \end{bmatrix},$$

а относительные погрешности $\delta_M = 0$ и $\delta_K = 1,6\%$.

Второй способ позволил получить более точное значение оператора пересчета:

$$\mathbf{P}_{В12} = \begin{bmatrix} 1,3340 & 0,4299 & -0,8712 \\ 0,6380 & -0,3621 & -0,5347 \\ 0,9020 & -0,1478 & 1,3780 \end{bmatrix},$$

при котором относительные погрешности $\delta_M = 0$ и $\delta_K = 0,3\%$.

Для сравнения следует отметить, что при операторе пересчета, полученном путем решения уравнения (3), относительные погрешности $\delta_M = 43\%$, $\delta_K = 0$, а при операторе пересчета, удовлетворяющем нелинейному векторно-матричному уравнению правдоподобия, $\delta_M = 98\%$, $\delta_K = 0,1\%$. Отсюда видно, что предложенные способы целесообразно использовать для объединения опытных данных, полученных по результатам испытаний ЛА в различных условиях.

При изменении исходных данных точность решения задачи пересчета также может изменяться. Пусть, например, модельные оценки характеристик точности СУ в первых условиях имеют следующие значения:

$$\mathbf{M}_{M1} = [18 \quad 17 \quad 27]^T, \quad \mathbf{K}_{M1} = \begin{bmatrix} 514063 & 2564 & 90322 \\ 2564 & 21498 & 2076 \\ 90322 & 2076 & 1328211 \end{bmatrix}.$$

В этом случае относительные погрешности решения уравнений (2), (3) составили:

— при использовании оператора пересчета, полученного первым способом, $\delta_M = 0$, $\delta_K = 5,7 \%$;

— при использовании оператора пересчета, полученного вторым способом, $\delta_M = 0$, $\delta_K = 9,3 \%$;

— при использовании оператора пересчета, полученного путем решения уравнения (3), $\delta_M = 286 \%$, $\delta_K = 0$;

— при использовании оператора пересчета, полученного путем решения уравнения правдоподобия, $\delta_M = 182 \%$, $\delta_K = 0,2 \%$.

Заключение. Для оценивания характеристик точности СУ перспективного ЛА в процессе его опытной отработки полученные разнородные данные пересчитываются к некоторым заданным условиям испытаний. Предложены два способа определения операторов пересчета опытной информации, позволяющие, по сравнению с известными подходами, повысить качество оценивания точностных характеристик СУ ЛА. Приведенный демонстрационный пример показал, что целесообразно параллельно использовать оба способа, поскольку точность решения задачи пересчета существенно зависит от исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровская Л. Н., Круглов В. И., Кузнецов А. Г. и др. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: Учеб. пособие. М.: Логос, 2003. 736 с.
2. Буренок В. М., Найденов В. М. Испытательная база: выход из кризиса // Воздушно-космическая оборона. 2009. № 1 (44). С. 18—25.
3. Лобейко В. И., Кислов О. В., Литвинов С. П., Соколов С. П. Анализ существующей системы испытаний вооружения и военной техники на полигоне, научно-методическое обеспечение экспериментальной отработки вооружения и военной техники // Вестн. воздушно-космической обороны. 2018. № 3(19). С. 10—16.
4. Ардашов А. А., Арсеньев В. Н., Силантьев С. Б. Метод обработки неоднородной статистической информации о характеристиках точности системы управления // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5 (78). С. 55—59.
5. Поляков А. П. и др. Справочник по эксплуатации космических средств / Под ред. А. П. Полякова. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006. 758 с.
6. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 415 с.
7. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб: КОРОНА-принт; М.: Альтекс-А, 2004. 384 с.
8. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Физматлит, 2002. 496 с.
9. Миронов В. И. Задача приведения вариаций фазовых координат нелинейных динамических систем к заданным условиям испытаний // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1970. № 3. С. 12—19.
10. Арсеньев В. Н. Определение характеристик точности системы по результатам ее испытаний в различных условиях испытаний // Изв. АН РФ. Техн. кибернетика. 1992. № 2. С. 118—121.

11. Арсеньев В. Н., Лабетский П. В. Оценивание характеристик точности системы управления ракеты-носителя по результатам пусков в различных условиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 1. С. 27—32.
12. Кетков Ю. Л., Кетков А. Ю., Шульц М. М. MATLAB 7: Программирование, численные методы. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
13. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.
14. Бахтин В. И., Иванишко И. А., Лебедев А. В., Пиндрик О. И. Метод множителей Лагранжа. Минск: БГУ, 2012. 40 с.

Сведения об авторах

- Владимир Николаевич Арсеньев** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов
- Сергей Валерьевич Слатов** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов; E-mail: 3011987@mail.ru
- Андрей Александрович Ядренкин** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов

Поступила в редакцию 21.10.22; одобрена после рецензирования 27.10.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Aleksandrovskaya L.N., Kruglov V.I., Kuznetsov A.G. et al. *Teoreticheskiye osnovy ispytaniy i eksperimental'naya obrabotka slozhnykh tekhnicheskikh sistem* (Theoretical Foundations of Testing and Experimental Development of Complex Technical Systems), Moscow, 2003, 736 p. (in Russ.)
2. Burenok V.M., Naydenov V.G. *Zhurnal vozdushno-kosmicheskaya oborona*, 2009, no. 1(44), pp. 18–25. (in Russ.)
3. Lobeyko V.I., Kislov O.V., Litvinov S.P., Sokolov S.P. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony*, 2018, no. 3(19), pp. 10–16. (in Russ.)
4. Ardashov A.A., Arseniev V.N., Silantyev S.B. *Information and Control Systems*, 2015, no. 5(78), pp. 55–59. (in Russ.)
5. Polyakov A.P. et al. *Spravochnik po ekspluatatsii kosmicheskikh sredstv* (Space Operations Handbook), St. Petersburg, 2006, 758 p. (in Russ.)
6. Elyasberg P.E. *Opredeleniye dvizheniya po rezul'tatam izmereniy* (Determining Motion from Measurements), Moscow, 1976, 415 p. (in Russ.)
7. Ryzhikov Yu.I. *Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i tekhnologii* (Simulation Modeling. Theory and Technology), St. Petersburg, 2004, 384 p. (in Russ.)
8. Pugachev V.S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* (Theory of Probability and Mathematical Statistics), Moscow, 2002, 496 p. (in Russ.)
9. Mironov V.I. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Technical cybernetics*, 1970, no. 3, pp. 12–19. (in Russ.)
10. Arseniev V.N. *Proceedings of the Academy of Sciences of the RF. Technical cybernetics*, 1992, no. 2, pp. 118–121. (in Russ.)
11. Arseniev V.N., Labetskiy P.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 1(58), pp. 27–32.
12. Ketkov Yu.L., Ketkov A.Yu., Shults M.M. *MATLAB 7: Programirovaniye, chislennyye metody* (MATLAB 7: Programming, Numerical Methods), St. Petersburg, 2005, 752 p. (in Russ.)
13. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* (Theory of Matrices), Moscow, 1988, 552 p. (in Russ.)
14. Bakhtin V.I., Ivanishko I.A., Lebedev A.V., Pindrik O.I. *Metod mnozhitel'ey Lagranzha* (Method of Lagrange Multipliers), Minsk, 2012, 40 p. (in Russ.)

Data on authors

- Vladimir N. Arseniev** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Onboard Information and Measuring Systems
- Sergey V. Slatov** — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Onboard Information and Measuring Systems; E-mail: 3011987@mail.ru
- Andrey A. Yadrenkin** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Onboard Information and Measuring Systems

Received 21.10.22; approved after reviewing 27.10.22; accepted for publication 25.01.23.

**ВЫБОР ДИСКРЕТНОГО КВАДРАТИЧНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА
ПРИ РАСЧЕТЕ ЦИФРОВОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ
С КОНЕЧНЫМ ВРЕМЕНЕМ ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНОГО ПРОЦЕССА
ПРИ ЗАДАННОМ ПОРЯДКЕ АСТАТИЗМА**

А. М. Коновалов, А. И. Коршунов*

*Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“,
Санкт-Петербург, Россия*

*a.i.korshunov@mail.ru

Аннотация. Рассматривается влияние выбранного дискретного квадратичного показателя качества при расчете цифровой следящей системы на характер ее переходной характеристики. Показано, что при выборе показателя качества в виде суммы квадратов первой разности дискретной переходной характеристики перерегулирование оказывается наименьшим. Доказано необходимое и достаточное условие исключения скрытых колебаний, требующее включить в числитель желаемой передаточной функции „все нули“ числителя дискретной передаточной функции непрерывной части. Установлено, что для повышения качества переходного процесса необходимо уменьшать период дискретизации при сохранении времени переходного процесса.

Ключевые слова: *переходная характеристика, дискретный квадратичный показатель качества, конечное время затухания свободного процесса, заданный порядок астатизма*

Ссылка для цитирования: Коновалов А. М., Коршунов А. И. Выбор дискретного квадратичного показателя качества при расчете цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса при заданном порядке астатизма // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 183—194. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-183-194.

**SELECTION OF A DISCRETE QUADRATIC QUALITY INDEX
WHEN CALCULATING A DIGITAL TRACKING SYSTEM WITH A FINITE DECAY TIME
OF A FREE PROCESS AT A GIVEN ASTATISM ORDER**

A. M. Konovalov, A. I. Korshunov *

*Naval Polytechnic Institute of Admiral N.G. Kuznetsov Naval Academy,
St. Petersburg, Russia*

*a.i.korshunov@mail.ru

Abstract. The influence of the choice of a discrete quadratic quality index in calculation of a digital servo system on the character of its transient response is considered. It is shown that when choosing a quality indicator in the form of the sum of squares of the first difference of the discrete transient response, the overshoot turns out to be the smallest. A necessary and sufficient condition for eliminating hidden oscillations is proved, which requires that “all zeros” of the numerator of the discrete transfer function of the continuous part be included in the numerator of the desired transfer function. It is established that in order to improve the quality of the transient process, it is necessary to reduce the sampling period while maintaining the time of the transient process.

Keywords: transient characteristic, discrete quadratic quality index, final time of free process attenuation, preset order of astatism

For citation: Konovalov A. M., Korshunov A. I. Selection of a discrete quadratic quality index when calculating a digital tracking system with a finite decay time of a free process at a given astatism order. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 183—194 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-183-194.

Введение. Цифровые следящие системы — одни из важнейших функциональных элементов автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) как в производственной, так и в оборонной области. Функциональная задача ЦСС — преобразование управляющего воздействия на технологический объект, определяемого вычислительным

комплексом АСУ в цифровой форме, в соответствующее механическое воздействие в реальном масштабе времени. Назначение ЦСС определяет основные требования к ней — высокое быстродействие и точность воспроизведения. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет рассматривать ЦСС как импульсные системы, пренебрегая квантованием сигналов по уровню. Это позволяет использовать известное свойство линейных стационарных импульсных систем — возможность полного затухания свободного процесса за конечное время, обеспечивающее наибольшее быстродействие импульсной системы управления.

Возможность получения в линейной стационарной импульсной системе конечного времени полного затухания свободного процесса известно давно [1—4 и др.]. Такие процессы в линейных импульсных системах назывались в отечественной литературе процессами конечной длительности, а в переводной — аperiodическими процессами, что, очевидно, менее удачно отражает их основную особенность.

В доступных публикациях последнего времени не содержится исследований, посвященных развитию методики синтеза цифровых автоматических систем с конечным временем затухания свободного процесса. Более того, встречаются публикации высокого уровня, например [5] — учебник для вузов („Допущено учебно-методическим объединением вузов России по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебника“), содержащий ошибочные рекомендации по синтезу электроприводов постоянного тока с конечным временем переходного процесса. Выполнение указанных рекомендаций приводит к длительному затуханию колебаний выходной величины внутри периодов дискретизации уже после окончания дискретного переходного процесса, называемых „скрытыми колебаниями“. Это определило необходимость исправления указанных ошибок и дальнейшего развития методики синтеза систем данного класса, чему посвящены, например, работы [6—11]. Напомним основные положения данных работ.

Так, статья [6] посвящена исправлению указанных ошибок. В работе [7] показана возможность с помощью линейного дискретного корректирующего устройства получить конечное время полного затухания свободного процесса в линеаризованной модели ЦСС, представленной на рис. 1; это время не превышает целого числа периодов дискретизации, равного порядку непрерывной части (НЧ) ЦСС. На рис. 1: ИИЭ — идеальный импульсный элемент с периодом дискретизации T , ДКУ — дискретное корректирующее устройство, ФНП — фиксатор нулевого порядка.

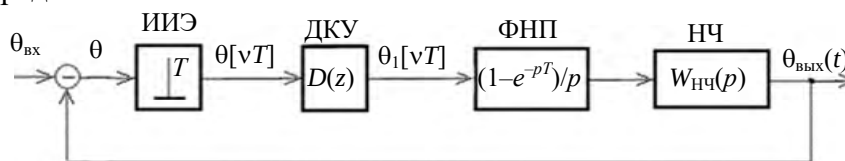


Рис. 1

В работе [7] показано, что управляемость и наблюдаемость дискретной модели непрерывной части системы — достаточные условия реализации затухания свободного процесса за конечное время. Предложена методика выбора простейшей передаточной функции $D(z)$ дискретного корректирующего устройства.

В работе [8] рассмотрен расчет ЦСС с минимальным конечным временем затухания свободного процесса при заданном требовании к ее точности:

$$\theta_k \leq \theta_{k \text{ доп}} \text{ при } \Omega \leq \Omega_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где θ_k — скоростная ошибка, $\theta_{k \text{ доп}}$ — ее допустимая величина, $\Omega_{\text{доп}}$ — допустимая скорость слежения при передаточной функции непрерывной части, типовой для электромеханических ЦСС:

$$W_{\text{НЧ}}(p) = \frac{K}{p(T_1 p + 1) \dots (T_{n-1} p + 1)}, \quad n \leq 5, \quad (2)$$

где K — коэффициент преобразования, $T_1, \dots, T_{n-1}$ — постоянные времени исполнительного двигателя, усилителя мощности и других элементов НЧ.

Установлена пропорциональность скоростной ошибки периоду дискретизации T , что при выборе T по требованию точности может вызвать завышение частоты дискретизации и сужение линейной зоны системы.

Во второй части [9] указанной работы предложен метод расчета ДКУ, обеспечивающий конечное время полного затухания свободного процесса, превышающее минимальное, при сохранении скоростной ошибки как при минимальном времени полного затухания свободного процесса. В работе [10] предложена методика расчета ДКУ, обеспечивающая не только конечное время полного затухания свободного процесса, но и необходимый порядок астатизма ЦСС (второй или третий). Учету времени чистого запаздывания в прямой цепи при расчете дискретной коррекции ЦСС с минимальным временем полного затухания свободного процесса посвящена работа [11].

Постановка задачи. Будем полагать, что в процессе решения задачи вычисления задающего воздействия ЦСС шумы и помехи, содержащиеся в исходных данных, эффективно подавляются и сглаживаются. Это позволяет считать вычисленные задающие воздействия ЦСС детерминированными и обеспечивать заданную динамическую точность ЦСС в линейной зоне посредством выбора необходимого порядка астатизма при конечном времени затухания свободного процесса.

В линейной зоне можно получить практически любое время полного затухания свободного процесса, выбрав необходимый период дискретизации (шаг квантования по времени T). Ограничено его уменьшение только сужением линейной зоны ЦСС [8].

Как известно [1—4, 8, 10], линеаризованная модель ЦСС, представленная на рис. 1, имеет конечное время затухания свободного процесса при передаточной функции замкнутой системы

$$\Phi_{\text{ЦСС}}(z) = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m}, \quad W_{\text{ЦСС}}(z) = \frac{\Phi_{\text{ЦСС}}(z)}{1 - \Phi_{\text{ЦСС}}(z)} = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)}, \quad (3)$$

где m — число периодов полного затухания свободного процесса, $G_{m-1}(z) = g_{m-1}z^{m-1} + \dots + g_1z + g_0$, $W_{\text{ЦСС}}(z)$ — передаточная функция разомкнутой системы.

Задание порядка астатизма r (1, 2, 3) накладывает на коэффициенты полинома числителя $\Phi(z)$ r условий [10]:

$$1 - G_{m-1}(1) = 1 - g_{m-1} - g_{m-2} - \dots - g_1 - g_0 = 0; \quad (4)$$

$$m - dG_{m-1}(z)/dz(1) = m - (m-1)g_{m-1} - (m-2)g_{m-2} - \dots - g_1 = 0, \quad (5)$$

$$m(m-1) - d^2G_{m-1}(z)/dz^2(1) = m(m-1) - (m-1)(m-2)g_{m-1} - \dots - 3 \cdot 2g_3 - 2g_2 = 0. \quad (6)$$

Выполнение условия (4) обеспечивает $r=1$, выполнение условий (4) и (5) — $r=2$, а выполнение условий (4), (5) и (6) — $r=3$.

В работе [10] показано, что при малых значениях m качество управления ЦСС в переходных режимах, определяемое величиной перерегулирования σ , оказывается неудовлетворительным. Вследствие этого приходится увеличивать число периодов полного затухания свободного процесса сверх минимального, равного порядку непрерывной части. Возникает задача выбора коэффициентов полинома $G_{m-1}(z)$, обеспечивающих наилучшее качество управления ЦСС в переходном режиме. Продолжим и далее оценивать его значением перерегулирования, определяемым по переходной характеристике системы $h(t)$: $\sigma = \max\{h(t) - 1\}$. Характер $h(t)$, а следовательно, и значение σ зависит от выбранных коэффициентов $G_{m-1}(z)$ и от свойств НЧ, определяемых ее передаточной функцией (2). Зависимость эта весьма сложна и делает невозможным аналитическое решение задачи определения коэффициентов $G_{m-1}(z)$, при

которых достигается $\min\{\sigma\}$. Задача упрощается, если частота дискретизации $2\pi/T$ настолько выше полосы пропускания НЧ, что практически $\sigma = \max\{h(t) - 1\} \approx \max\{h[nT] - 1\}$. Это позволяет оценивать с достаточной точностью качество переходных процессов по значениям $h[nT]$. Заметим, что полоса пропускания НЧ зависит не только от инерционности ее элементов, определяемой их постоянными времени, но и от ее коэффициента преобразования K (2). Практическая невозможность получения зависимости $\max\{h[nT] - 1\}$ от коэффициентов $g_i, i = 0, 1, \dots, m-1$, числителя передаточной функции ЦСС (3) заставляет при аналитическом решении задачи выбора коэффициентов полинома $G_{m-1}(z)$ использовать косвенный показатель качества. В работе [10] предложен квадратичный косвенный показатель качества переходного процесса:

$$\min V_1(g_0, g_1, \dots, g_{m-1}), \quad V_1 = \sum_{i=0}^{m-1} g_i^2. \quad (7)$$

Обоснованием его выбора, кроме простоты аналитического решения задачи, служат интуитивные соображения, основанные на полученном в работе [7] выражении дискретной переходной характеристики ЦСС:

$$h[vT] = Z^{-1} \left\{ \Phi_{\text{ЦСС}}(z) \cdot \frac{z}{z-1} \right\} = \begin{cases} 0, & v = 0; \\ \sum_{i=1}^v g_{m-i}, & v = 1, 2, \dots, m-1; \\ 1, & v \geq m, \end{cases}$$

согласно которому $g_i = \Delta h_i = h[iT] - h[(i-1)T]$, $i = 1, 2, \dots, m$, — первая разность переходной характеристики ЦСС.

Не менее обоснованным представляется также использование в показателе качества квадратичных функций:

$$V_2 = \sum_{i=0}^m \theta_i^2, \quad \theta_i = 1 - h[iT] = 1 - \sum_{k=1}^i g_{m-k}, \quad g_m = 0; \quad (8)$$

$$V_3 = \sum_{i=0}^m h^2[iT], \quad h[iT] = \sum_{k=1}^i g_{m-k}, \quad g_m = 0; \quad (9)$$

$$V_4 = \sum_{i=0}^m (g_{m-i} - g_{m-i-1})^2, \quad g_m = 0, \quad g_{-1} = 0. \quad (10)$$

При выборе порядка астатизма $r \geq 2$ задание V_2 или V_3 приводит к одинаковому результату, поскольку $V_2 = V_3 - (m+1)$ (см. Приложение 1).

Представляет значительный практический интерес выбор наилучшей из трех предложенных квадратичных функций: V_1 , V_2 (или V_3) и V_4 . Очевидна и необходимость исследования влияния на характер переходных процессов выбранного времени полного затухания свободной составляющей и периода дискретизации. Все эти вопросы — предмет исследования в настоящей статье.

Необходимость выбора коэффициентов числителя передаточной функции ЦСС с учетом ее непрерывной части. В реальных условиях выбор коэффициентов g_i числителя передаточной функции $\Phi(z)$ (3) ограничен требованием заданного порядка астатизма r и передаточной функцией непрерывной части $W_{\text{НЧ}}(p)$. Ее дискретная передаточная функция в случае использования фиксатора нулевого порядка (ФНП на рис. 1) определяется выражением [8—10]

$$W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_{\text{НЧ}}(p)}{p} \right\} = \frac{R_{n-1}(z)}{(z-1)Q_{n-1}(z)}, \quad (11)$$

где индекс „ $n-1$ “ обозначает степень соответствующего полинома, Z — символ обобщенного Z -преобразования, подразумевающий выполнение обратного преобразования Лапласа, дискретизацию результата и его обычное Z -преобразование [12, 13]; $Q_{n-1}(z) = (z-d_1)\dots(z-d_{n-1})$, $d_k = \exp(p_{k+1}T)$; $p_1 = 0$, p_k , $k = 2, \dots, n$, — полюсы $W_{\text{НЧ}}(p)$; $R_{n-1}(z) = \beta_{n-1}z^{n-1} + \dots + \beta_1z + \beta_0$.

Числитель $\Phi(z)$ необходимо определять в виде

$$G_{m-1}(z) = F_{m-n}(z)R_{n-1}(z) = g_{m-1}z^{m-1} + g_{m-2}z^{m-2} + \dots + g_1z + g_0, \quad (12)$$

где $F_{m-n}(z) = f_{m-n}z^{m-n} + f_{m-n-1}z^{m-n-1} + \dots + f_1z + f_0$.

Передачная функция дискретного корректирующего устройства [8—10]

$$D(z) = \frac{W_{\text{ЦСС}}(z)}{W_{\text{НЧ}}(z)} = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} \frac{(z-1)Q_{n-1}(z)}{R_{n-1}(z)} = \frac{Q_{m-1}(z)}{S_{m-1}(z)}, \quad (13)$$

где

$$Q_{m-1}(z) = F_{m-n}(z)Q_{n-1}(z) = q_{m-1}z^{m-1} + \dots + q_1z + q_0; \quad (14)$$

$$S_{m-1}(z) = [z^m - G_{m-1}(z)] / (z-1) = z^{m-1} + s_{m-2}z^{m-2} + \dots + s_1z + s_0, \quad (15)$$

$$s_{m-2} = 1 - g_{m-1}, \quad s_{m-3} = s_{m-2} - g_{m-2}, \quad \dots, \quad s_1 = s_2 - g_2, \quad s_0 = s_1 - g_1 = g_0. \quad (16)$$

Заметим, что введение в полином $G_{m-1}(z)$ множителя $R_{n-1}(z)$:

- обеспечивает „грубость“ ЦСС [12];
- упрощает $D(z)$ — передачную функцию ДКУ [12, 13];
- исключает возможные скрытые колебания, проявляющиеся в колебаниях $h(t)$ при $t > mT$, хотя $h[iT] = 1$ при $i > m$ (m — целое число) [10] (см. Приложение 2).

Выбор дискретного показателя качества переходного процесса. Требуется определить, какой показатель качества обеспечивает наименьшее перерегулирование σ . Для этого необходимо выразить коэффициенты g_i , $i = 0, 1, 2, \dots, m-1$, полинома $G_{m-1}(z)$ через коэффициенты полиномов сомножителей $F_{m-n}(z)$ и $R_{n-1}(z)$, подставить полученные выражения g_i в выбранный показатель качества $V_i(g_{m-1}, \dots, g_1, g_0)$. Исследование на минимум выбранного показателя качества V_i как функции коэффициентов $V_i = V_i(f_{m-n}, \dots, f_1, f_0)$ полинома $F_{m-n}(z)$ позволяет определить оптимальные значения f_i , $i = 0, 1, \dots, m-n$. Вычислив по выражению (13) передачную функцию ДКУ $D(z)$, легко на модели получить переходную характеристику ЦСС $h(t)$, необходимую для оценки качества управления в переходном режиме при выбранном V_i , как это сделано в работе [10]. Сравнивая $h(t)$, соответствующие различным V_i , можно выбрать показатель качества, наилучший по получаемому перерегулированию.

Исследование на экстремум выбранного показателя качества V_i при заданных условиях (4), (5) или (4)—(6), обеспечивающих заданный порядок астатизма r , соответственно $r=2$ или $r=3$, целесообразно выполнять, вводя множители Лагранжа λ_1, λ_2 при $r=2$ или $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ при $r=3$ [10]. При этом задача сводится к исследованию на условный экстремум функции

$$U = V_i(f) + \sum_{k=1}^r \lambda_k \varphi_k(f), \quad (17)$$

где $f^T = [f_{m-n}, \dots, f_1, f_0]$ — вектор-строка; $\varphi_k(f)$, $k = \overline{1, 3}$, — функции вектора f , получаемые при подстановке в k -е условие коэффициентов g_i , $i = \overline{0, m-1}$, выраженных через искомые коэффициенты f_i , $i = \overline{0, m-n}$, и коэффициенты β_i , $i = \overline{0, n-1}$, числителя $W_{\text{НЧ}}(z)$.

Вычислив частные производные $\partial U / \partial f_i$, $i = \overline{0, m-n}$, и приравняв их к нулю, получим $m-n+1$ линейных уравнений

$$\frac{\partial U}{\partial f_i} = \frac{\partial V(f)}{\partial f_i} + \sum_{k=1}^r \lambda_k \frac{\Phi_k(f)}{\partial f_i}. \quad (18)$$

Совместно с условиями, обеспечивающими заданный порядок астатизма r ($r=2$ или $r=3$),

$$\Phi_k(f) = c_k, \quad k = \overline{1, r}, \quad c_1 = 1 / \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i, \quad c_2 = m, \quad c_3 = m(m-1) \quad (19)$$

получается система $m-n+1+r$ линейных уравнений, необходимых для вычисления $m-n+1$ значений f_i и r множителей Лагранжа λ_k .

Систему линейных уравнений (18) и (19) можно записать в векторно-матричном виде:

$$AX=B, \quad (20)$$

где $X^T = [f^T, \lambda^T]$, $\lambda^T = [\lambda_1, \lambda_2]$ при $r=2$, $\lambda^T = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$ при $r=3$.

Матрица A и вектор B зависят от выбора квадратичной функции $V_i(7)$ —(10).

Пример. Продолжим рассмотрение ЦСС из работы [10]:

$$m=5, \quad n=2, \quad r=2, \quad W_{\text{НЧ}}(p) = \frac{K}{p(T_1 p + 1)}, \quad W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{\beta_1 z + \beta_0}{(z-1)(z-d_1)}, \quad \beta_1 = K[T - T_1(1-d_1)],$$

$$\beta_0 = K[T_1(1-d_1) - T d_1], \quad K = 10 \text{ с}^{-1}, \quad T_1 = T = 0,1 \text{ с}, \quad KT = 1, \quad d_1 = \exp(-1), \quad \beta_1 = d_1, \quad \beta_0 = 1 - 2\beta_1.$$

Согласно изложенному выше

$$X^T = [f_3, f_2, f_1, f_0, \lambda_1, \lambda_2];$$

$$g_4 = \beta_1 f_3, \quad g_3 = \beta_1 f_2 + \beta_0 f_3, \quad g_2 = \beta_1 f_1 + \beta_0 f_2, \quad g_1 = \beta_1 f_0 + \beta_0 f_1, \quad g_0 = \beta_0 f_0; \quad (21)$$

$$\Phi_1(f) = f_3 + f_2 + f_1 + f_0 = 1 / (\beta_1 + \beta_0), \quad (22)$$

$$\Phi_2(f) = (4\beta_1 + 3\beta_0) f_3 + (3\beta_1 + 2\beta_0) f_2 + (2\beta_1 + \beta_0) f_1 + \beta_1 f_0 = m = 5. \quad (23)$$

При $V = V_2 = \sum_{i=1}^m \theta_i^2$, $\theta_i = 1 - h[iT] = 1 - \sum_{k=1}^{m-i} g_{m-k}$ (8) имеем

$$1 - h(T) = 1 - g_4 = 1 - b_1 f_3, \quad 1 - h(2T) = 1 - g_4 - g_3 = 1 - (b_1 + b_0) f_3 - b_1 f_2;$$

$$1 - h(3T) = 1 - g_4 - g_3 - g_2 = 1 - (b_1 + b_0)(f_3 + f_2) - b_1 f_1;$$

$$1 - h(4T) = 1 - g_4 - g_3 - g_2 - g_1 = 1 - (b_1 + b_0)(f_3 + f_2 + f_1) - b_1 f_0, \quad (24)$$

$$V_2 = (1 - b_1 f_3)^2 + (1 - (b_1 + b_0) f_3 - b_1 f_2)^2 + (1 - (b_1 + b_0)(f_3 + f_2) - b_1 f_1)^2 + \\ + (1 - (b_1 + b_0)(f_3 + f_2 + f_1) - b_1 f_0)^2.$$

Выполнив дифференцирование согласно выражению (18), с учетом формул (22)–(24) получим выражения для матрицы A и вектора B :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 4\beta_1 + 3\beta_0 & 3\beta_1 + 2\beta_0 & 2\beta_1 + 3\beta_0 & \beta_1 & 0 & 0 \\ e + 3b & a + 2b & a + b & a & 1 & 4\beta_1 + 3\beta_0 \\ a + 2b & e + 2b & a + b & a & 1 & 3\beta_1 + 2\beta_0 \\ a + b & a + b & e + b & e_0 & 1 & 2\beta_1 + \beta_0 \\ a & a & a & e & 1 & \beta_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1/(\beta_1 + \beta_0) \\ 5 \\ 2(4\beta_1 + 3\beta_0) \\ 2(3\beta_1 + 2\beta_0) \\ 2(2\beta_1 + \beta_0) \\ 2\beta_1 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где $a = 2\beta_1(\beta_1 + \beta_0)$, $b = 2(\beta_1 + \beta_0)^2$, $e = 2\beta_1^2$.

Заметим для сравнения, что при выборе $V = V_3 = \sum_{i=1}^m h^2[iT]$ (9) получаем такую же матрицу A и вектор B , отличающийся четырьмя нижними элементами, равными нулю.

Решение системы уравнений (20)

$$X = A^{-1}B \quad (26)$$

при замене B на значение, имеющее четыре нижних нулевых элемента, изменяет только значения λ_1 и λ_2 , что несложно доказать. Это, как будет видно из дальнейшего, не приводит к изменению передаточной функции ДКУ $D(z)$, а следовательно, и характера $h(t)$, что и следовало ожидать исходя из доказанного в Приложении 1 равенства $V_3 = V_2 + (m+1)$.

При выборе $V = V_4 = \sum_{i=0}^m (g_{m-i} - g_{m-i-1})^2$, $g_m = 0$, $g_{-1} = 0$ (10) получаем:

$$\begin{aligned} V_4 &= g_4^2 + (g_4 - g_3)^2 + (g_3 - g_2)^2 + (g_2 - g_1)^2 + (g_1 - g_0)^2 + g_0^2 = \\ &= b_1^2 f_3^2 + [(b_1 - b_0) f_3 - b_1 f_2]^2 + [b_0 f_3 + (b_1 - b_0) f_2 - b_1 f_1]^2 + \\ &+ [b_0 f_2 + (b_1 - b_0) f_1 - b_1 f_0]^2 + [b_0 f_1 + (b_1 - b_0) f_0]^2 + b_0^2 f_0^2. \end{aligned} \quad (27)$$

Выполнив дифференцирование согласно выражению (18), с учетом формул (22)–(24) получим выражения для матрицы A и вектора B :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 4\beta_1 + 3\beta_0 & 3\beta_1 + 2\beta_0 & 2\beta_1 + 3\beta_0 & \beta_1 & 0 & 0 \\ a & -e & -b & 0 & 1 & 4\beta_1 + 3\beta_0 \\ -e & a & -e & -b & 1 & 3\beta_1 + 2\beta_0 \\ -b & -e & a & -e & 1 & 2\beta_1 + 3\beta_0 \\ 0 & -b & -e & a & 1 & \beta_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1/(\beta_1 + \beta_0) \\ 5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где $a = 2[\beta_1^2 + (\beta_1 - \beta_0)^2 + \beta_0^2]$, $b = 2\beta_1\beta_0$, $e = 2(\beta_1 - \beta_0)^2$.

Вычислив элементы матрицы A и вектора B (25) и решение (26) системы линейных уравнений (20), получим вектор коэффициентов $f^T = [3,3645, -2,3548, 1,6052, 1,0330]$. Определив по формулам (21) элементы вектора, находим $g^T = [1,2377, 2,2778 \cdot 10^{-2}, -3,1711 \cdot 10^{-2}, 4,4149 \cdot 10^{-2}, -2,7295 \cdot 10^{-1}]$.

Результаты вычислений позволяют определить коэффициенты полиномов передаточной функции дискретного фильтра (13)–(16):

$$D(z) = \frac{q_4 z^4 + q_3 z^3 + q_2 z^2 + q_1 z + q_0}{s_4 z^4 + s_3 z^3 + s_2 z^2 + s_1 z + s_0}, \quad (29)$$

где $q_4 = f_3 = 3,3645$, $q_3 = f_2 - f_3 d_1 = -3,5925$, $q_2 = f_1 - f_2 d_1 = 2,4714$, $q_1 = f_0 - f_1 d_1 = -1,6235$, $q_0 = -f_0 d_1 = 3,8000 \cdot 10^{-1}$, $s_4 = 1$, $s_3 = s_4 - g_4 = -2,3774 \cdot 10^{-1}$, $s_2 = s_3 - g_3 = -2,6051 \cdot 10^{-1}$, $s_1 = s_2 - g_2 = -2,2880 \cdot 10^{-1}$, $s_0 = s_1 - g_1 = g_0 = -2,7295 \cdot 10^{-1}$.

Произведя аналогичные вычисления для выражений матрицы A и вектора B (28), получаем: $f^T = [1,9661, 2,8654 \cdot 10^{-1}, 5,1779 \cdot 10^{-1}, -1,1885]$, $g^T = [7,2329 \cdot 10^{-1}, 6,2494 \cdot 10^{-1}, 2,6620 \cdot 10^{-1}, -3,0040 \cdot 10^{-1}, -3,1405 \cdot 10^{-1}]$ и вычисляем коэффициенты $D(z)$ (29):

$$\begin{aligned} q_4=f_3=1,9661, q_3=f_2-f_3d_1=-4,3675 \cdot 10^{-1}, q_2=f_1-f_2d_1=4,1238 \cdot 10^{-1}, q_1=f_0-f_1d_1=-1,3790, \\ q_0=-f_0d_1=4,3722 \cdot 10^{-1}; s_4=1, s_3=s_4-g_4=2,7671 \cdot 10^{-1}, s_2=s_3-g_3=3,4822 \cdot 10^{-1}, \\ s_1=s_2-g_2=-6,144 \cdot 10^{-1}, s_0=s_1-g_1=g_0=-3,1402 \cdot 10^{-1}. \end{aligned}$$

Моделирование рассчитанной ЦСС при двух вариантах $D(z)$ произведено по схеме, приведенной на рис. 2.

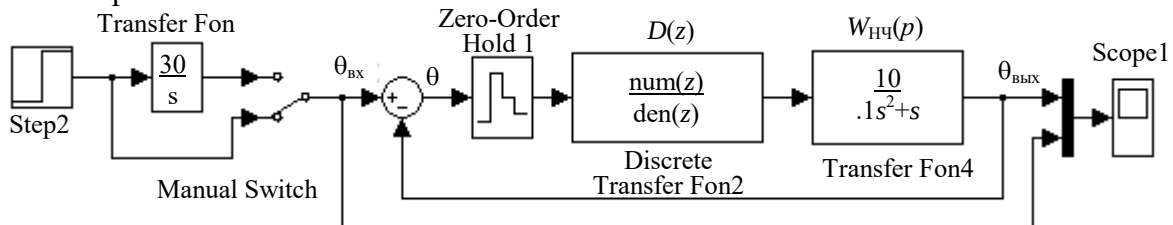


Рис. 2

На рис. 3 представлены переходные характеристики ЦСС $h(t)$ при трех вариантах передаточной функции ДКУ $D(z)$: 1 — при $D(z)$, рассчитанном в работе [10] с использованием показателя качества V_1 (7); 2, 3 — при $D(z)$, рассчитанном выше с использованием показателя V_2 (8) или V_3 (9); 4 — при $D(z)$, рассчитанном с V_4 (10).

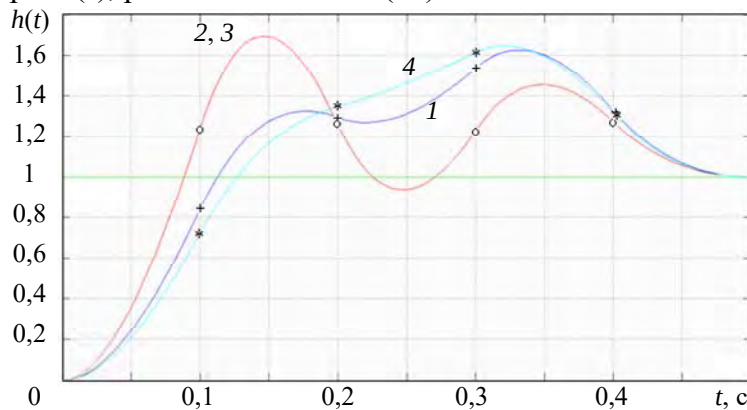


Рис. 3

Аналогичные исследования проведены для той же ЦСС при задании порядка астатизма $r=3$, $m=8$, $T=0,1$ с. Полученные на модели переходные характеристики $h(t)$ представлены на рис. 4, где обозначения кривых 1, 2 и 3, 4 соответствуют принятым для рис. 3.

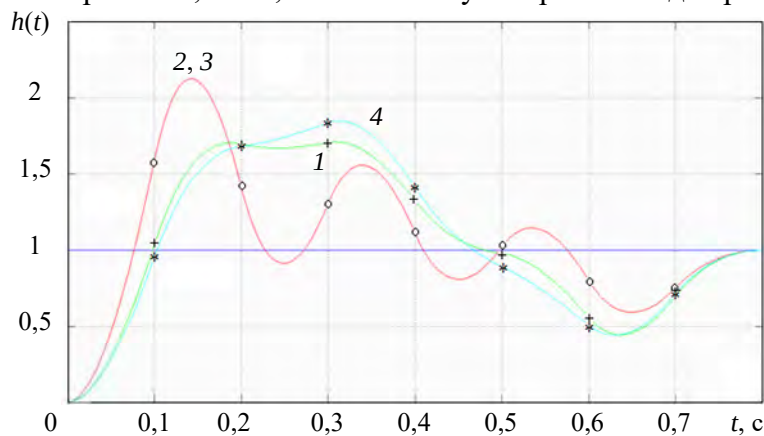


Рис. 4

Анализ полученных результатов показал существенное влияние выбранного дискретного квадратичного показателя качества при расчете ЦСС на характер ее переходной характеристики и снижение качества переходного процесса при повышении порядка астатизма.

Оптимальное качество переходного процесса, оцениваемое величиной перерегулирования σ , дает показатель, представляющий сумму квадратов первой разности дискретной переходной характеристики $h[nT]$. Кроме того, сравнение матриц A (25) и (28) системы уравнений (20) с аналогичной, полученной для этого показателя в работе [10] и приведенной ниже матрицей

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 4\beta_1 + 3\beta_0 & 3\beta_1 + 2\beta_0 & 2\beta_1 + 3\beta_0 & \beta_1 & 0 & 0 \\ 2(k\beta_1^2 + \beta_0^2) & 2\beta_1\beta_0 & 0 & 0 & 1 & 4\beta_1 + 3\beta_0 \\ 2\beta_1\beta_0 & 2(\beta_1^2 + \beta_0^2) & 2\beta_1\beta_0 & 0 & 1 & 3\beta_1 + 2\beta_0 \\ 0 & 2\beta_1\beta_0 & 2(\beta_1^2 + \beta_0^2) & 2\beta_1\beta_0 & 1 & 2\beta_1 + 3\beta_0 \\ 0 & 0 & 2\beta_1\beta_0 & 2(\beta_1^2 + \beta_0^2) & 1 & \beta_1 \end{bmatrix},$$

показывает ее наименьшую сложность, оцениваемую числом нулевых элементов.

Влияние выбранного периода дискретизации на качество переходного процесса.

Несколько необычный для непрерывных систем характер переходной характеристики цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса, близким к минимальному, при одновременном обеспечении заданного порядка астатизма объясняется негативным проявлением дискретного характера управления. Однако именно дискретный характер управления позволяет получить полное затухание свободной составляющей непрерывной управляемой величины за конечное время. Для ослабления негативного проявления дискретного характера управления следует ужесточать выполнение условий теоремы Котельникова, т.е. повышать частоту дискретизации (уменьшать период дискретизации T) и снижать полосу пропускания непрерывной части системы.

Простое уменьшение периода дискретизации T при одновременном расширении полосы пропускания может не дать желаемого результата. Например, если в рассмотренной системе значение T уменьшить с 0,1 до 0,03 с при сохранении числа периодов дискретизации $m=5$, то время переходного процесса уменьшится до $mT=5 \cdot 0,03=0,15$ с, т.е. в $0,5/0,15=3,33$ раза. При этом форма $h(t)$ практически сохраняется (кривая 2 на рис. 5). Исходная переходная характеристика — кривая 1 на рис. 5 та же, что и кривая 1 на рис. 3. Практически она сжимается по оси времени также в 3,33 раза. Объясняется это увеличением коэффициента преобразования ДКУ — $|D(0)|$, рассчитанного для нового значения T , примерно в 14 раз, что расширяет полосу пропускания.

Совершенно другой результат дает уменьшение T при сохранении неизменного времени переходного процесса, т.е. при соответствующем увеличении числа тактов m за время затухания свободного процесса. Так, в системе, рассчитанной для $T=0,05$ с, $m=10$, получена переходная характеристика (кривая 3 на рис. 5), имеющая перерегулирование на 20 % меньшее, чем в исходной системе (кривая 1).

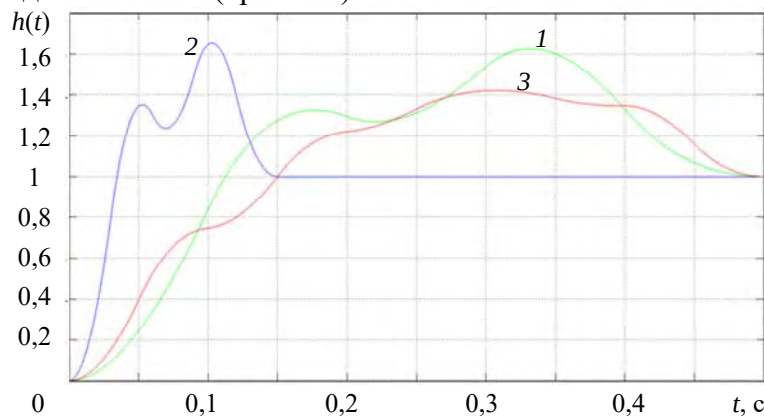


Рис. 5

Выводы

1. Выбор дискретного квадратичного показателя качества при расчете ДКУ существенно влияет на характер переходной характеристики ЦСС.
2. При показателе качества, представляющем сумму квадратов первой разности дискретной переходной характеристики, перерегулирование оказывается наименьшим.
3. Доказано, что для исключения скрытых колебаний в числитель желаемой передаточной функции необходимо и достаточно включать „все нули“ числителя дискретной передаточной функции непрерывной части.
4. Для повышения качества переходного процесса необходимо уменьшать период дискретизации при сохранении времени переходного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем. М.: Физматгиз, 1963. 968 с.
2. Джурю Э. Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963. 567 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
4. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1986. 447 с.
5. Анучин А. С. Системы управления электроприводов. М.: МЭИ, 2015. 372 с.
6. Кориунов А. И. Расчет цифровых систем управления электроприводами с конечным временем затухания свободных процессов // Электротехника. 2020. № 12. С. 50—54.
7. Кориунов А. И. Цифровая следящая система с конечным временем затухания свободного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 12. С. 1078—1086.
8. Коновалов А. М., Кориунов А. И. Расчет цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса. Ч. I. Минимальное время переходного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 786—793.
9. Коновалов А. М., Кориунов А. И. Расчет цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса. Ч. II. Время переходного процесса, большее минимального // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 794—802.
10. Коновалов А. М., Кориунов А. И. Цифровая следящая система с конечным временем затухания свободного процесса и заданным порядком астатизма // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 888—896.
11. Коновалов А. М., Кориунов А. И. Учет времени чистого запаздывания в прямой цепи при расчете дискретной коррекции цифровой следящей системы с минимальным временем полного затухания свободного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 554—564.
12. Бесекерский В. А. Цифровые автоматические системы. М.: Наука, 1976. 576 с.
13. Кориунов А. И. Основы теории управления. Ч. II. Основы теории и систем автоматического управления. Петродворец: ВМПИ, 2017. 167 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Доказательство эквивалентности показателей качества V_2 и V_3 при $r > 1$. С учетом определения V_2 (8) и V_3 (9) получаем

$$V_2 = \sum_{i=0}^m (1 - h[iT])^2 = m + 1 - 2 \sum_{i=1}^m h[iT] + V_3 \quad (h[0] = 0). \quad (\text{П1})$$

Учитывая $h[iT] = g_{m-1} + g_{m-2} + \dots + g_{m-i}$, $i = 1, 2, \dots, m$, получаем в соответствии с формулами (4) и (5)

$$\sum_{i=1}^m h[iT] = (m-1)g_{m-1} + (m-2)g_{m-2} + \dots + g_1 + 1 = m + 1.$$

Таким образом, выражение (П1) приобретает вид

$$V_2 = m + 1 - 2(m + 1) + V_3 = V_3 - (m + 1).$$

Следовательно, $\frac{\partial V_2}{\partial g_k} = \frac{\partial V_3}{\partial g_k}$, $k = 0, 1, 2, \dots, m-1$, что при исследовании на экстремум да-

ет одинаковое значение коэффициентов g_k .

2. Доказательство необходимости и достаточности выполнения условия (12) для исключения скрытых колебаний после окончания дискретного процесса. Для доказательства получим передаточную функцию замкнутой ЦСС

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) &= \frac{W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)}{1 + W_{\text{ЦСС}}(z, 0)} = \frac{F_{m-n}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m - G_{m-1}(z)} \left/ \left(1 + \frac{F_{m-n}(z)R_{n-1}(z, 0)}{z^m - G_{m-1}(z)} \right) \right. = \\ &= \frac{F_{m-n}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m - G_{m-1}(z) + F_{m-n}(z)R_{n-1}(z, 0)} = \frac{F_{m-n}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m},\end{aligned}\quad (\text{П2})$$

где

$$W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) = D(z)W_{\text{НЧ}}(z, \varepsilon) = \frac{F_{m-n}(z)Q_{n-1}(z)}{S_{m-1}(z)} \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{(z-1)Q_{n-1}(z)} = \frac{F_{m-n}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m - G_{m-1}(z)},$$

$$G_{m-1}(z) = F_{m-n}(z)R_{n-1}(z, 0), \quad R_{n-1}(z, 0) = R_{n-1}(z).$$

Из выражения (П2) следует равенство $h[iT, \varepsilon] = \text{const}$, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ при $i \geq m$ вследствие нулевых полюсов $\Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)$. Выполнение условия (4) гарантирует $h[iT, \varepsilon] = 1$ при $i \geq m$. Постоянные при $i \geq m$ значения $h[iT, \varepsilon]$ не могут отличаться от единицы вследствие отсутствия у НЧ чисто мнимых полюсов.

Для доказательства необходимости включим в $G_{m-1}(z)$ только нули $R_{n-1}(z)$, большие или равные по модулю единице, образующие полином $R_{n_1-1}(z)$, что гарантирует „грубость“ системы [12]. Очевидно, что $R_{n-1}(z) = R_{n_1-1}(z)R_{n-n_1-1}(z)$, где $R_{n-n_1-1}(z)$ — полином, нули которого равны нулям $R_{n-1}(z)$, меньшим по модулю единицы. Тогда, получив по выражению (13)

$$D(z) = \frac{W_{\text{ЦСС}}(z)}{W_{\text{НЧ}}(z)} = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} \frac{(z-1)Q_{n-1}(z)}{R_{n-1}(z)}, \quad G_{m-1}(z) = R_{n_1}(z)F_{m-1-n_1}(z),$$

вычислим передаточные функции ЦСС:

$$\begin{aligned}W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) &= D(z)W_{\text{НЧ}}(z, \varepsilon) = \frac{R_{n_1}(z)F_{m-1-n_1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} \frac{(z-1)Q_{n-1}(z)}{R_{n-1}(z)} \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{(z-1)Q_{n-1}(z)} = \\ &= \frac{F_{m-1-n_1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{R_{n-n_1-1}(z)}, \\ \Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) &= \frac{W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)}{1 + W_{\text{ЦСС}}(z, 0)} = \frac{F_{m-1-n_1}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{[z^m - G_{m-1}(z)]R_{n-n_1-1}(z)} \left/ \left(1 + \frac{F_{m-1-n_1}(z)R_{n-1}(z, 0)}{[z^m - G_{m-1}(z)]R_{n-n_1-1}(z)} \right) \right. = \\ &= \frac{F_{m-1-n_1}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{[z^m - G_{m-1}(z)]R_{n-n_1-1}(z) + R_{n-1}(z)F_{m-1-n_1}(z)} = \frac{F_{m-1-n_1}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m R_{n-n_1-1}(z)}, \\ \Phi_{\text{ЦСС}}(z) &= \Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)|_{\varepsilon=0} = \frac{F_{m-1-n_1}(z)R_{n_1}(z)}{z^m} = \frac{F_{m-1}(z)}{z^m}.\end{aligned}$$

Равенство нулю всех полюсов передаточной функции $\Phi_{\text{ЦСС}}(z)$ совместно с условием (4) доказывает равенство $h[iT] = 1$ при $i \geq m$. Наличие у передаточной функции $\Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)$

отличных от нуля, но меньших по модулю единицы, полюсов доказывает неравенство $h[iT, \varepsilon] \neq 1$ при $i \geq m$. Этим установлено наличие скрытых затухающих колебаний внутри интервалов дискретизации при $i \geq m$.

Сведения об авторах

- Артём Михайлович Коновалов** — Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, факультет систем автоматизации управления (офицер Военно-морского флота РФ)
- Анатолий Иванович Коршунов** — д-р техн. наук, профессор; Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, кафедра радиоэлектроники; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

Поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Tsytkin Ya.Z. *Teoriya lineynykh impul'snykh sistem* (Theory of Linear Impulse Systems), Moscow, 1963, 968 p. (in Russ.)
2. Jury E.J. *Sampled-data control systems*, NY, Wiley, London, Chapman and Hall, 1958.
3. Isermann R. *Digital Control Systems*, Berlin etc., 1981.
4. Kuo B.C. *Digital Control Systems*, NY, Chicago, San Francisco, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980.
5. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* (Electric Drive Control Systems), Moscow, 2015, 373 p. (in Russ.)
6. Korshunov A.I. *Russian Electrical Engineering*, 2020, no. 12(91), pp. 767–771.
7. Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 12(62), pp. 1078–1086. (in Russ.)
8. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 9(63), pp. 786–793. (in Russ.)
9. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 9(63), pp. 794–802. (in Russ.)
10. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 10(63), pp. 888–896. (in Russ.)
11. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 8(65), pp. 554–564. (in Russ.)
12. Besekerskiy V.A. *Tsifrovye avtomaticheskie sistemy* (Digital Automatic Systems), 1976, 576 p. (in Russ.)
13. Korshunov A.I. *Osnovy teorii upravleniya. Osnovy teorii i sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Bases of the Theory of Management. Bases of the Theory and Systems of Automatic Control), Petrodvorets, 2017, 167 p. (in Russ.)

Data on authors

- Artyom M. Konovalov** — Naval Polytechnic Institute of Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy, Faculty of Control Systems Automation, Russian Navy officer
- Anatoly E. Korshunov** — Dr. Sci., Professor; Naval Polytechnic Institute of Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy, Department of Radio Electronics; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

Received 23.11.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 25.01.23.

МОДЕЛИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В. И. Поляков*, Ф. Ф. Зиннатулин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*v_i_polyakov@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вычислительные процессы получения входных данных, обработки данных, предобработки в базе данных, хранения в базе данных, а также вывода данных пользователю. Разработаны графоаналитическая и программная модели вычислительного процесса. С помощью данных моделей можно провести верификацию вычислительного процесса информационной системы. В качестве примера рассмотрены вычислительные процессы информационной системы „1С:Предприятие“.

Ключевые слова: информационная система, архитектура, вычислительный процесс, верификация, данные

Ссылка для цитирования: Поляков В. И., Зиннатулин Ф. Ф. Модели вычислительных процессов информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 195—199. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-195-199.

MODELS OF COMPUTING PROCESSES OF AN INFORMATION SYSTEM

V. I. Polyakov*, F. F. Zinnatulín

ITMO University, St. Petersburg, Russia

*v_i_polyakov@mail.ru

Abstract. The computational processes of obtaining input data, data processing, preprocessing in the database, storing in the database, and also outputting data to the user are considered. Graphic-analytical and software models of the computational process are developed. With the help of these models, it is possible to verify the computational process in the information system. As an example, the computational processes in the 1C:Enterprise information system are considered.

Keywords: information system, architecture, computing process, verification, data

For citation: Polyakov V. I., Zinnatulín F. F. Models of computing processes of an information system. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 195—199 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-195-199.

Введение. Программное обеспечение (ПО) — важный компонент компьютерного мира, выполняющий главные задачи вычислительных блоков обработки информации. Потребность в программном обеспечении, удовлетворяющем целям бизнес-процессов компаний, растет с каждым днем, так же как и объемы создаваемого ПО [1—3]. Информационные системы (ИС) являются одной из главных программных сущностей в области программного обеспечения, а архитектура и методы проектирования больших ИС представляют значительный интерес [4, 5]. Разработка информационной системы — трудоемкий процесс, требующий выполнения этапов анализа, проектирования, программирования и тестирования [6]. Объекты информационных систем являются основными составляющими, обеспечивающими выполнение вычислительных задач. В свою очередь, вычислительные процессы являются одними из самых важных объектов информационной системы и содержат набор данных и блоков обработки информации [7]. Результат вычислительного процесса может быть использован далее для вычисления других информационных единиц [1, 8].

Архитектура ИС. Рассмотрим вычислительные процессы информационной системы „1С:Предприятие“. Каждый вычислительный процесс ИС выполняет задачи в контуре

программной архитектуры. Поэтому для исследования вычислительных процессов ИС „1С:Предприятие“ необходимо рассмотреть ее архитектуру.

Главные блоки архитектуры следующие:

1. Блок получения входных данных.
2. Блок обработки входных данных.
3. Блок предобработки данных для хранения в БД.
4. Блок базы данных.
5. Блок вывода информации пользователю.
6. Блок параметров и пользовательских настроек.

Блок получения входных данных предназначен для выполнения вычислительного процесса, который содержит следующие этапы:

- определение типа входного выражения;
- определение диапазона входного выражения;
- определение размера входного выражения;
- определение возможности сведения входного выражения к типу используемых в ИС величин;
- определение возможности передачи входного выражения.

Блоком обработки входных данных выполняется следующий вычислительный процесс, содержащий приведенные ниже этапы:

- определение возможности получения выражения из блока получения входных данных;
- обработка полученного значения для решения поставленной задачи;
- сравнение типа результирующего значения (после обработки) с типом используемых в ИС величин;
- передача результирующего значения.

Этапы вычислительного процесса обработки данных являются главными для выполнения требований ИС.

Блок предобработки данных для хранения в БД выполняет вычислительный процесс, который содержит следующие этапы:

- фиксация значения, полученного из блока входных данных;
- сравнение типа полученного значения с типом значения, используемым в БД ИС;
- приведение типа полученного значения к типу, используемому в БД ИС;
- фиксация передачи приведенного значения.

Блок базы данных реализует вычислительный процесс, который заключается в выполнении следующих операций:

- фиксация значения, полученного из блока предобработки данных для хранения в БД ИС;
- сравнение типа полученного значения с типом таблицы БД ИС;
- проверка факта сохранения значения в БД ИС;
- фиксация факта получения значения из БД ИС;
- сравнение стандартного набора операций, полученного из блока предобработки данных, со значением, сохраненным в БД ИС.

Блок вывода информации выполняет вычислительный процесс, содержащий следующие этапы:

- фиксация факта получения значения из блока входных данных;
- определение типа полученного значения;
- приведение полученного значения к типу, используемому для вывода данных пользователю;
- фиксация факта вывода значения пользователю.

Блок параметров и пользовательских настроек выполняет вычислительный процесс, который содержит следующие этапы:

- приведение полученного значения к типу, хранимому в описываемом блоке;
- фиксация факта сохранения приведенного значения в блоке параметров и пользовательских настроек;
- фиксация факта пересылки значения в блок входных данных.

Блоки информационной системы всегда взаимосвязаны и соединены связями (рис. 1). Все блоки содержат достаточный функциональный набор действий. Каждый блок должен выполнять, как правило, 3-4 приведенные задачи в информационной системе.

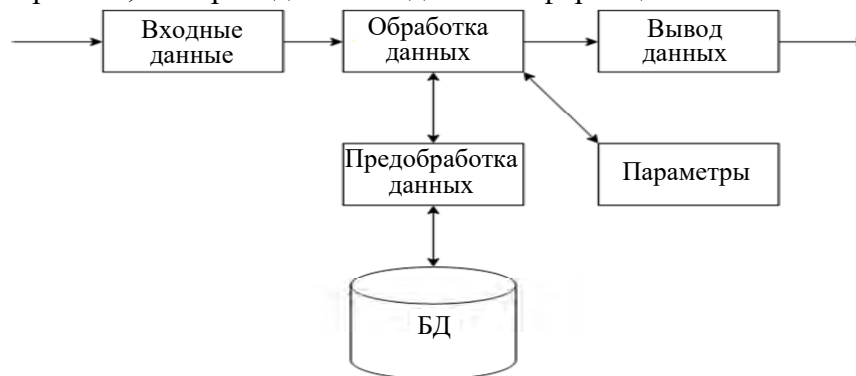


Рис. 1

Описанная архитектура ИС позволяет сделать вывод, что для верификации всей системы достаточно верифицировать 3 объекта: блок входных данных, блок обработки данных и блок вывода данных.

Модели вычислительного процесса. Проблема анализа качества аппаратного и программного обеспечения становится сегодня все более острой, особенно в связи с широким внедрением информационных технологий и нанотехнологий в приборостроении [8]. Для проведения верификации необходимо установить связь между объектами. Верификацию вычислительного процесса можно провести с помощью графоаналитической и программной моделей [9, 10]. На рис. 2 показана графоаналитическая модель блока входных данных (для ИС „ИС:Предприятие“), а на рис. 3 — программная модель блока (реализованная с помощью языка РНР).

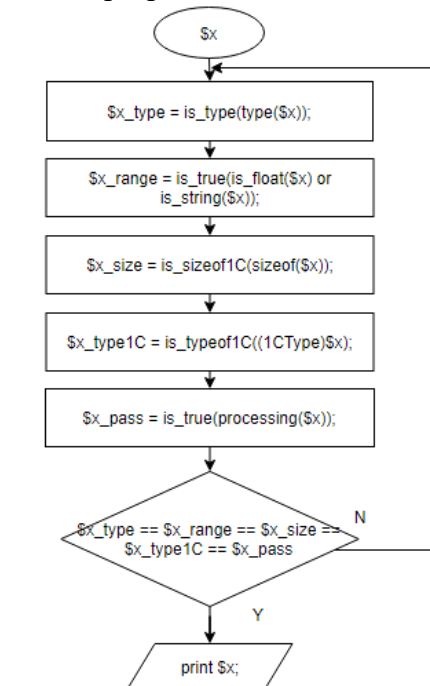


Рис. 2

```

2  a:
3  ~  function initValues(){
4      $x = 0;
5  }
6
7  ~  function setValues($x){
8      $x_type = is_type(type($x));
9      $x_range = is_true(is_float($x) or is_string($x));
10     $x_size = is_sizeof1C(sizeof($x));
11     $x_type1C = is_typeof1C(1CType)$x);
12     $x_pass = is_true(processing($x));
13 }
14
15 initValues(VALUE);
16 setValues(VALUE);
17
18 ~ if($x_type == true){
19 ~     if($x_range == true){
20 ~         if($x_size == true){
21 ~             if($x_type1C == true){
22 ~                 if($x_pass == true){
23 ~                     print $x;
24 ~                 }else goto a;
25 ~             }else goto a;
26 ~         }else goto a;
27 ~     }else goto a;
28 }else goto a;
    
```

Рис. 3

Программная модель включает в себя инициализацию начального значения проверяемой переменной, установку значений проверяемой переменной и прохождение условий для

проверки значений переменных. Инициализация реализована в виде функции `initValues()`, установка значений реализована функцией `setValues()`, условия представлены набором операторов-условий `if()`. Планируется проведение верификации по программной модели для каждого вычислительного процесса информационной системы, а также сравнение ее с результатом верификации согласно графоаналитической модели также для каждого вычислительного процесса ИС.

Заключение. Исследование вычислительных процессов позволяет, как следует из вышеизложенного, сформулировать их описание, а также сформировать набор действий для последующего анализа и дальнейшего выполнения их верификации. Вычислительный процесс обработки данных является главным вычислительным процессом информационной системы. Исследование схемы перемещения данных вычислительных процессов показало, что основное движение данных происходит от базы данных к блоку вывода информации. В ходе анализа рассмотрены графоаналитическая и программная модели верификации вычислительных процессов информационной системы. В качестве примера рассмотрена информационная система „ИС:Предприятие“. Другие информационные системы имеют схожее представление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыков А. Г., Кочетков И. В., Поляков В. И., Чистиков Э. Г. Синтез программ на основе описания графоаналитической модели // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30, вып. 4. С. 561—566.
2. Зыков А. Г., Голованев Я. С., Поляков В. И. Автоматизация проверки программ с помощью графических аналитических моделей вычислительного процесса // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 3. С. 398—402. DOI: 10.15827/0236-235X.127.398-402.
3. Зыков А. Г., Поляков В. И., Чистиков Э. Г., Кочетков И. В. Формализация анализа программной реализации вычислительного процесса в САПР // ИСиИТ'16: Тр. Конгресса интеллектуальных систем и информационных технологий. Таганрог: ЮФУ, 2016. Т. 1. С. 69—75.>.
4. Шнепс-Шнеппе М. А., Сухомлин В. А., Намиот Д. Э. О глобальных информационных системах // Междунар. журн. открытых информационных технологий. 2017. № 4 [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/o-globalnyh-informatsionnyh-sistemah>>, 12.10.2021.
5. Зыков С. В. Теоретико-методологические основы построения корпоративных порталов // Исследовано в России. 2005 [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-i-metodologicheskie-osnovy-postroeniya-korporativnyh-portalov>>, 11.03.2021.
6. Хабитуев Б. В., Хандаров Ф. В., Балакишев Э. Г., Нимаев С. А. Информационная система „Конференция“ // Вестн. БГУ. Математика, информатика. 2013. № 1 [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-sistema-konferentsiya>>, 10.12.2021.
7. Петров А. Б. О характеристиках информационной системы // Облако науки. 2020. № 3 [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/o-harakteristikah-informatsionnoy-sistemy>>, 10.12.2021.
8. Зыков А. Г., Безруков А. В., Немолочнов О. Ф., Поляков В. И., Андронов А. В. Графоаналитические модели вычислительных процессов в САПР // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 4 (74). [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/grafanaliticheskie-modeli-vychislitelnyh-protsessov-v-sapr>>, 07.11.2021.
9. Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Поляков В. И. Верификация в исследовательских, образовательных унифицированных и промышленных системах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2003. Т. 11. С. 146—151.
10. Зыков А. Г., Кочетков И. В., Поляков В. И., Чистиков Э. Г. Методы анализа вычислительного процесса с использованием графоаналитической модели // Материалы конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям „ИСИИТ“17. 2017. Т. 2. С. 121—129.

Сведения об авторах

Владимир Иванович Поляков

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники;
E-mail: v_i_polyakov@mail.ru

Файль Фидазевич Зиннатулин

— аспирант; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: f_f_zinnatulin@mail.ru

Поступила в редакцию 25.10.22; одобрена после рецензирования 31.10.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Zykov A.G., Kochetkov I.V., Polyakov V.I., Chistikov E.G. *Software & Systems*, 2017, no. 4(30), pp. 561–566. (in Russ.)
2. Zykov A.G., Golovanov Ya.S., Polyakov V.I. *Software & Systems*, 2019, no. 3(32), pp. 398–402, DOI: 10.15827/0236-235X.127.398-402. (in Russ.)
3. Zykov A.G., Polyakov V.I., Chistikov E.G., Kochetkov I.V. *Kongress intellektual'nykh sistem i informatsionnykh tekhnologiy* (Congress of Intelligent Systems and Information Technologies), Congress materials, Taganrog, 2016. vol. 1. C. 69–75. (in Russ.)
4. Sneps-Sneppe M., Sukhomlin V., Namiot D. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, no. 4(5), pp. 55–62. (in Russ.)
5. Zykov S.V. *Elektronnyy zhurnal "Issledovano v Rossii"*, 2005, no. 8, pp. 2278–2285, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/220.pdf>. (in Russ.)
6. Khabituev B.V., Khandarov F.V., Balakshiev E.G., Nimaev S.A. *BSU Bulletin. Mathematics, Informatics*, 2013, no. 1, pp. 21–25. (in Russ.)
7. Petrov A.B. *Cloud of Science*, 2020, no. 3(7), pp. 510–516. (in Russ.)
8. Zykov A.G., Bezrukov A.V., Nemolochnov O.F., Polyakov V.I., Andronov A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 4(74), pp. 116–120. (in Russ.)
9. Nemolochnov O.F., Zykov A.G., Polyakov V.I. et al. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2003, no. 11, pp. 146–151. (in Russ.)
10. Zykov A.G., Kochetkov I.V., Polyakov V.I., Chistikov E.G. *Kongress intellektual'nykh sistem i informatsionnykh tekhnologiy* (Congress of Intelligent Systems and Information Technologies), Congress materials, Taganrog, 2017, vol. 2, pp. 121–129. (in Russ.)

Data on authors

Vladimir I. Polyakov

— PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Technique; E-mail: v_i_polyakov@mail.ru

Fail F. Zinnatulin

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Technique; E-mail: f_f_zinnatulin@mail.ru

Received 25.10.22; approved after reviewing 31.10.22; accepted for publication 25.01.23.

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ВИЗИРНОЙ ЦЕЛИ**А. Н. Шилин¹, Д. А. Роцин^{2*}¹ *Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*² *Научно-исследовательский испытательный центр Железнодорожных войск, Москва, Россия** *whwhwh@mail.ru*

Аннотация. Представлен метод цифровой обработки изображения контура визирной цели в частотной области, позволяющий значительно повысить точность оптоэлектронного устройства при измерении угловых координат объектов. Контур визирной цели на изображении представляется в комплексной плоскости посредством построения ее профилограммы относительно базовой окружности. Для анализа и расчета погрешностей определения контура получен фурье-образ развернутой профилограммы контура визирной цели путем применения дискретного фурье-преобразования, что позволило определить характеристики рассеяния случайной составляющей погрешности измерения координат центра контура визирной цели и оценить погрешности измерения ее параметров на изображении. Параметры контура визирной цели определены по формулам Спрэгга путем решения оптимизационной задачи по вычислению минимума гладкой целевой функции. По результатам фильтрации изображения визирной цели с помощью идеального фильтра высоких частот достигнуто уменьшение абсолютной погрешности измерения угловых координат визирной цели более чем в два раза относительно результатов, полученных с помощью метода наименьших квадратов. Применение методов цифровой обработки изображения визирной цели в частотной области позволило привести погрешность измерения угловых координат оптоэлектронного устройства в пределы допускаемой среднеквадратической погрешности измерения угла для тахеометра технического класса точности.

Ключевые слова: визирная цель, оптоэлектронное устройство, цифровая обработка изображений, частотная область, фурье-преобразование, аддитивный шум, фильтр высоких частот, профилограмма

Ссылка для цитирования: Шилин А. Н., Роцин Д. А. Применение частотного метода обработки изображения для повышения точности определения параметров визирной цели // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 200—209. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-200-209.

**APPLICATION OF THE FREQUENCY METHOD OF IMAGE PROCESSING
TO IMPROVE THE ACCURACY
OF DETERMINING SIGHTING TARGET PARAMETERS**A. N. Shilin¹, D. A. Roshchin^{2*}¹ *Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia*² *Research and Testing Center of the Railway Troops, Moscow, Russia*
* *whwhwh@mail.ru*

Abstract. A method for digital processing of the image of sighting target contour in the frequency domain is presented, which makes it possible to significantly improve the accuracy of the optoelectronic device when measuring the angular coordinates of objects. The contour of the sighting target image is represented in the complex plane by constructing its profilogram relative to the base circle. To analyze and calculate the errors in determining the contour, the Fourier image of the expanded profilogram of the target contour is obtained by applying a discrete Fourier transform, which makes it possible to determine the scattering characteristics of the random component of the error in measuring the coordinates of the center of the sighting target contour and to evaluate the errors of its image parameters measurement. The contour parameters of the sighting target are determined using the Spragg formulas by solving the optimization problem of calculating the minimum of a smooth objective function. According to results of target image filtering with the help of an ideal high-pass filter, the absolute error in measuring the sighting target angular coordinates is reduced by more than two times relative to results obtained using the least squares method. The application of methods of digital image processing of the sighting target in the frequency domain enables to bring the measurement error of the angular coordinates of the optoelectronic device within the limits of the permissible average square error of angle measurement for a total station of technical accuracy class.

Keywords: sighting target, optoelectronic device, digital image processing, frequency domain, Fourier transform, additive noise, high-pass filter, profilogram

For citation: Shilin A. N., Roshchin D. A. Application of the frequency method of image processing to improve the accuracy of determining sighting target parameters. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 200—209 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-200-209.

Введение. Оптоэлектронные устройства являются основной частью многих интеллектуальных информационно-измерительных систем, а также систем технического зрения. Сложность задач, решаемых такими системами, постоянно увеличивается, а требования к их техническим характеристикам повышаются. При этом вопросы повышения надежности и точности подобных систем особенно актуальны, в частности, для таких важных направлений, как безопасность и автоматизация процессов управления техникой. Визирные цели в основном используются при проведении инженерно-геодезических изысканий, а также в системах технического зрения, предназначенных для ориентирования в пространстве. С их помощью осуществляется обнаружение объектов и определение их параметров: координат, геометрических размеров, скорости и направления движения. Например, визирные цели могут применяться для локальной ориентации и навигации беспилотной техники [1], контроля пространственного положения строительной техники, а также автоматизации производства земляных работ [2—4]. Системы технического зрения находят применение и в современных геодезических приборах — тахеометрах, позволяя обнаруживать установленную на штативе визирную цель (отражатель) и отслеживать ее перемещение [5]. Это значительно упрощает работу геодезиста, позволяя ему самостоятельно перемещать визирную цель (вешку с отражателем) с места на место и с помощью пульта дистанционного управления подавать команду тахеометру снять и зарегистрировать в памяти все необходимые отсчеты.

Обнаружение визирной цели в безотражательном режиме возможно только на основе визуальных признаков [6]. Погрешность визирования геодезического прибора напрямую зависит от погрешности определения координат центра визирной цели. При этом точность обнаружения визирной цели на изображении зависит от таких качественных характеристик изображения, как контрастность, резкость, освещенность, цветопередача, оптические искажения, шумы, экспозиция, динамический диапазон, засветка, блики на линзах и т.д. Даже в лабораторных условиях практически невозможно получить идеальное изображение визирной цели. В связи с этим первостепенной задачей для любых оптических систем является улучшение качественных характеристик формируемого ими изображения. В последнее время значительное внимание уделяется частотным методам обработки изображений, что в первую очередь вызвано возросшей производительностью вычислительных машин, а также появлением более совершенных методов обработки изображения в частотной области.

В настоящей статье представлен метод цифровой обработки изображения контура визирной цели в частотной области, который позволяет повысить точность определения координат визирной цели и способствует увеличению дальности проведения бесконтактных измерений с помощью различных оптических и оптоэлектронных систем.

Определение параметров визирной цели в частотной области. Уровень резкости контура и другие скачкообразные изменения яркости визирной цели на изображении связаны с высокочастотными составляющими [7]. Воздействие частотных методов цифровой обработки изображения оценивалось с помощью оптоэлектронного устройства и визирной цели, имеющей форму шара радиусом 22,5 мм. В качестве оптоэлектронного устройства использовалась цифровая видеокамера с типом сенсора CMOS, имеющая следующие технические характеристики: разрешение кадра изображения 2048×1536 пкс, физический размер пиксела 2,2×2,2 мкм, фокусное расстояние объектива 5 мм, динамический диапазон 100 дБ, кадровая

частота видеосъемки 30 Гц. Все измерения проводились в лаборатории с климатической системой, поддерживающей постоянную температуру 20 °С, а также источником света, обеспечивающим постоянный уровень освещенности визирной цели 30 лк.

Изображение визирной цели (рис. 1, а) представлялось в виде двумерной функции $f(x, y)$. Цвет пиксела на изображении задавался с помощью трехкомпонентного вектора в цветовой модели RGB, в которой каждый компонент цвета имеет 256 градаций:

$$\mathbf{c}(x, y) = \begin{bmatrix} r(x, y) \\ g(x, y) \\ b(x, y) \end{bmatrix},$$

где $\forall n \in r(x, y) \vee g(x, y) \vee b(x, y) : n < 256 | r(x, y), g(x, y), b(x, y) \in N$.

Насыщенность компонентов цвета на изображении определялась из выражения

$$\zeta(x, y) = |r(x, y) - g(x, y)| + |r(x, y) - b(x, y)| + |g(x, y) - b(x, y)|.$$

Обнаружение контура визирной цели (рис. 1, б) осуществлялось путем вычисления градиента для каждой точки изображения по методу Ди Зензо [8].

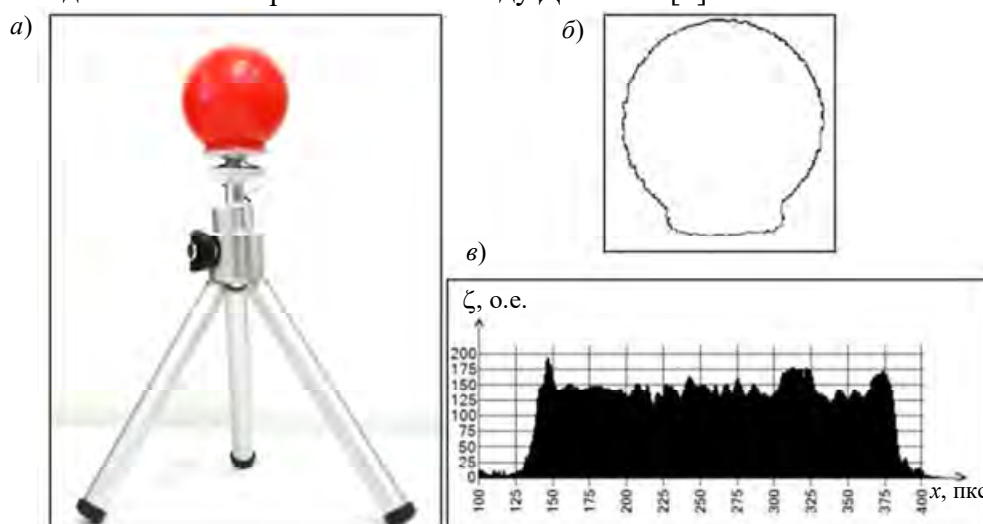


Рис. 1

На гистограмме насыщенности цвета, построенной в горизонтальном сечении изображения визирной цели, из-за недостаточной резкости изображения наблюдается размытость краев (рис. 1, в). Вследствие этого контур визирной цели имеет явно выраженное отклонение формы от окружности. Как следует из проведенных ранее исследований [9, 10], наиболее полное описание геометрических свойств контура сферических объектов можно получить, если в качестве базы выбрана средняя окружность [11]. Наиболее часто для определения параметров базовой средней окружности (координат ее центра и радиуса) используется метод Спрэгга. Данный метод обладает высокой точностью при условии равномерной дискретизации сигнала и относительно малых эксцентриситетах. Соответственно, параметры базовой средней окружности (x_0 , y_0 и r_0), аппроксимирующей контур визирной цели на изображении, можно определить по формулам Спрэгга [12—14]:

$$x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i; y_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i; r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i,$$

где x_i , y_i — декартовы координаты точек M_i на контуре L , взятые с равным угловым шагом; r_i — длины радиус-векторов точек M_i ; x_0 , y_0 — координаты центра средней окружности; r_0 — радиус средней окружности, n — количество точек контура.

Развернутая профилограмма контура визирной цели на изображении $\Delta r(\varphi)$ относительно ее среднего радиуса представлена на рис. 2 в виде периодической функции.

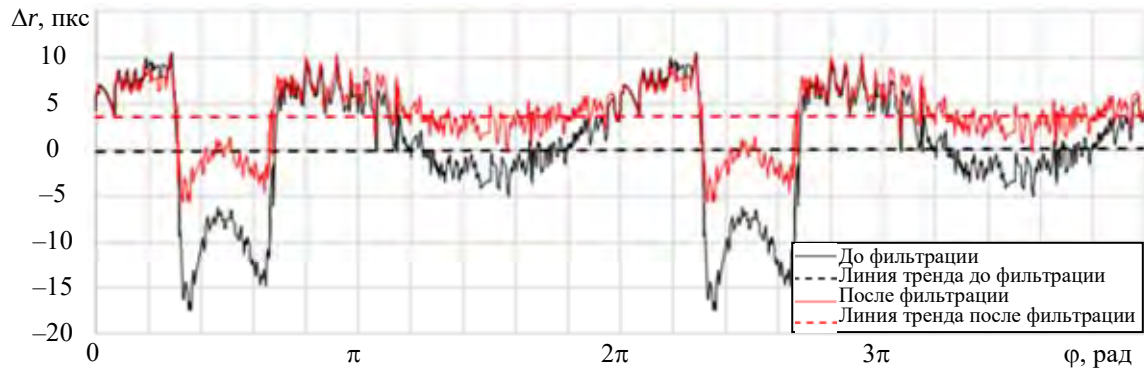


Рис. 2

При анализе погрешностей определения контура визирной цели использовался спектральный метод, основанный на разложении функции ее контура в полярных координатах в ряд Фурье [15]:

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\varphi + \varphi_k),$$

где k — коэффициент, определяющий отклонение формы контура визирной цели от окружности; φ — переменный угол, образуемый радиус-вектором с полярной осью; r_0 — радиус средней окружности, определяемый как среднее значение функции $r(\varphi)$; A_k и φ_k — амплитуда и начальная фаза k -гармоники, характеризующей погрешность формы, которые определяются с помощью следующих выражений:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \varphi_k = \arctg(b_k / a_k),$$

где параметры a_k и b_k определяются как

$$a_k = \frac{1}{\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \cos(k\varphi) \cdot \Delta\varphi, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \sin(k\varphi) \cdot \Delta\varphi.$$

При реализации спектрального метода сравнительно просто решается задача определения радиуса средней окружности и координат центра визирной цели, поскольку амплитуда и фаза первой гармоники определяют смещение центра относительно базы измерения. Представление профилограммы в виде суммы гармонических составляющих с помощью теоремы Котельникова упрощает решение вопроса о выборе шага дискретизации. Кроме того, может быть решена задача фильтрации гармонических составляющих.

Фурье-образ развернутой профилограммы контура визирной цели сформирован путем применения дискретного фурье-преобразования:

$$\hat{f}(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-i2\pi(ux/M)},$$

где M — количество пикселей в строке изображения.

Элементы фурье-образа в общем случае являются комплексными величинами. Однако поскольку функция $f(x)$ вещественная, то ее фурье-преобразование обладает симметрией по отношению к операции комплексного сопряжения

$$\hat{f}(u) = f^*(-u).$$

Спектр фурье-преобразования (рис. 3, а) определяется из выражения

$$|\hat{f}(u)| = \sqrt{\text{Re}^2 u + \text{Im}^2 u},$$

где $\text{Re} u$, $\text{Im} u$ — действительная и мнимая части фурье-образа.

Фазовый спектр фурье-преобразования (рис. 3, б) был получен из выражения

$$|\varphi(u)| = \arctg\left(\frac{\operatorname{Im} u}{\operatorname{Re} u}\right).$$

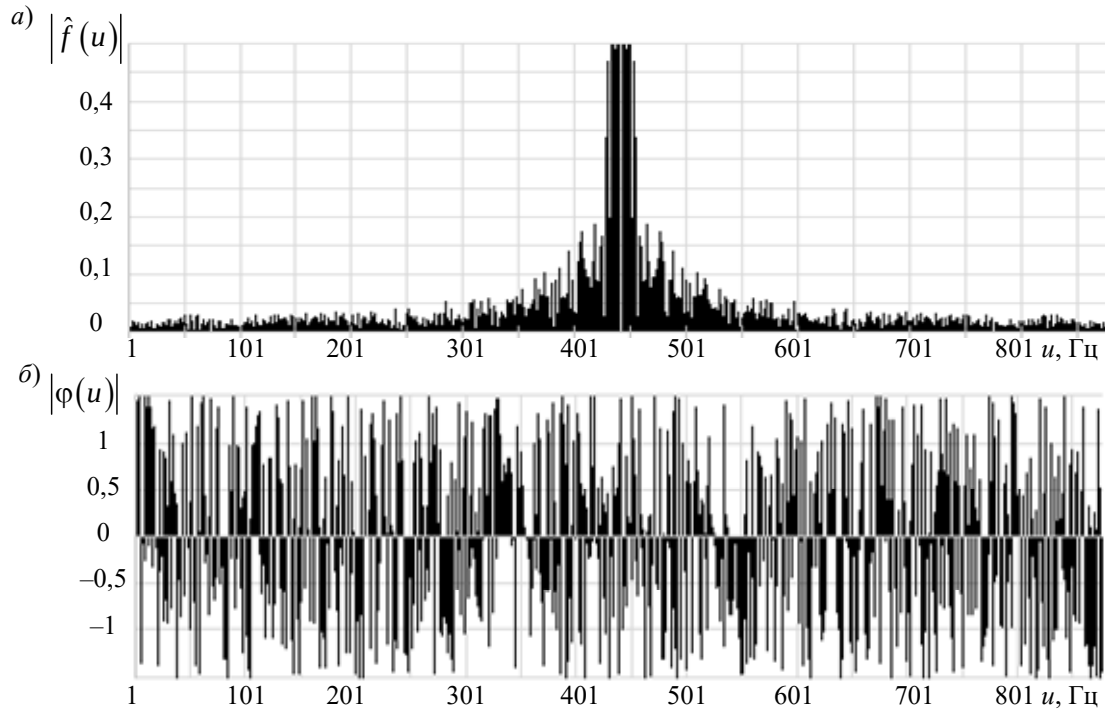


Рис. 3

Для анализа и расчета погрешностей определения контура также необходима информация о законах распределения величин r_0 , A_k и φ_k . Первая величина вызывает рассеяние результатов измерения радиуса визирной цели r_0 , вторая — рассеяние амплитуд A_k гармонических составляющих некруглости; третья — приводит к случайным величинам фазовых углов φ_k . Это означает, что r_0 , A_k и φ_k являются независимыми случайными величинами. В теории вероятностей случайные величины считаются независимыми, если известное значение одной из них не дает информации о других величинах. Двумерная функция плотности вероятности параметров A и φ задается выражением

$$p(A, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right).$$

Для определения одномерной функции плотности вероятности $p(A)$ двумерная функция плотности вероятности интегрируется по всем возможным значениям фазы:

$$p(A) = \int_0^{2\pi} p(A, \varphi) d\varphi = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right); \quad 0 < A < \infty.$$

Это распределение амплитуды является распределением Рэля. Интегрируя двумерную функцию плотности вероятности по всем возможным значениям амплитуды, находим функцию плотности вероятности

$$p(\varphi) = \int_0^{\infty} p(A, \varphi) dA = \frac{1}{2\pi} \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) dA.$$

Используя замену переменной $A^2 = z$, получаем

$$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{z}{2\sigma^2}\right) dz = \frac{1}{4\pi\sigma^2} 2\sigma^2 = \frac{1}{2\pi}; \quad 0 < \varphi < 2\pi.$$

Отсюда следует, что фаза распределена равномерно в промежутке $(0, 2\pi)$. Сопоставляя $p(A)$ и $p(\varphi)$ с выражением $p(A, \varphi)$, приходим к важному выводу, что $p(A, \varphi) = p(A)p(\varphi)$. Следовательно, амплитуда и фаза нормального узкополосного процесса, характеризующего отклонение формы визирной цели от окружности, являются независимыми случайными величинами в совпадающие моменты времени.

Из центральной предельной теоремы также следует, что сумма достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин, имеющих примерно одинаковые масштабы (ни одно из слагаемых не доминирует, не вносит в сумму определяющего вклада), имеет распределение, близкое к нормальному, которое называют распределением Гаусса. Поскольку

$$r_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \Delta\varphi,$$

где $r(\varphi)$ — достаточно большое количество слабо зависимых значений радиуса, взятых с малым шагом $\Delta\varphi$, то распределение $\hat{f}(r_0)$ будет близко к нормальному:

$$\hat{f}(r_0) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(r_0 - m_r)^2}{2\sigma_r^2} \right],$$

где σ_r — СКО радиуса визирной цели, m_r — математическое ожидание значения радиуса (центр рассеяния).

Соответственно амплитуда распределена по закону Рэлея:

$$\hat{f}(A_k) = \begin{cases} \frac{A_k}{\sigma_k^2} \exp \left(-\frac{A_k^2}{2\sigma_k^2} \right) & \text{при } A_k > 0; \\ 0 & \text{при } A_k \leq 0, \end{cases}$$

а фаза имеет равномерный закон распределения:

$$f(\varphi_k) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{при } 0 \leq \varphi_k \leq 2\pi, \\ 0 & \text{при } \varphi_k < 0, \varphi_k > 2\pi. \end{cases}$$

В результате математических преобразований получен теоретический закон распределения некруглости [16]:

$$\hat{f}(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \sigma_k^2}} \exp \left[-0,5(r - m_r)^2 \left(\sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \sigma_k^2 \right)^{-1} \right].$$

Высшая гармоническая составляющая k ограничивается номером гармоники p , с которой начинается отсчет микрогеометрии. Это распределение является гауссовым с центром рассеяния $m_r = m_R$ и дисперсией

$$\sigma_R^2 = \sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \frac{m_{A_k}^2 + \sigma_k^2}{2}.$$

Результаты частотной обработки изображения. Среднеквадратическое отклонение радиуса визирной цели на изображении $\sigma_R \approx 5,22$ пкс, также были определены СКО высшей гармонической составляющей $\sigma_k \approx 2,21$ пкс и величина центра рассеяния $m_R \approx 132,62$ пкс. График функции распределения $f(r)$ для этих значений характеристик показан на рис. 4.

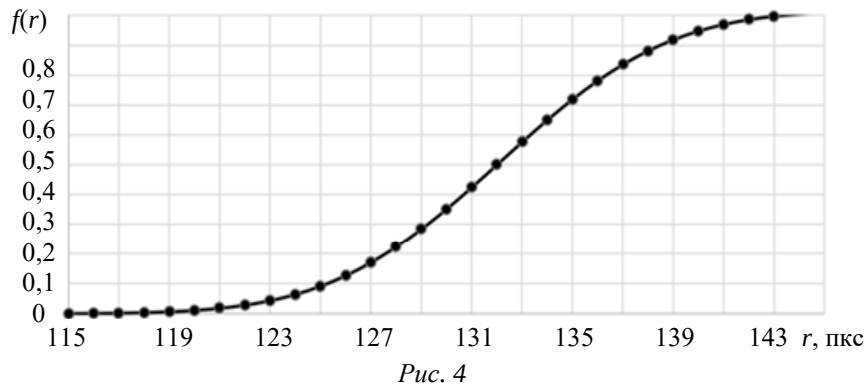


Рис. 4

В результате применения фильтра высоких частот из профилограммы были исключены значения радиусов, превышающие центр рассеяния m_R на величину σ_k . Для фильтрации применялся идеальный фильтр высоких частот, в радиусе действия гармоник p заданный выражением

$$h(u) = \begin{cases} 0 & \text{при } \hat{f}(u) \leq \sigma_k, \\ 1 & \text{при } \hat{f}(u) > \sigma_k. \end{cases}$$

Чтобы оценить результат фильтрации гармоник в спектре частот фурье-образа контура визирной цели, данный спектр частот необходимо привести к исходному виду — профилограмме (см. рис. 3). С этой целью применялось обратное преобразование Фурье:

$$g(\varphi) = \mathfrak{F}^{-1} [h(u) \hat{f}(u)].$$

Значение среднего радиуса r_0 вычислялось повторно для точек контура, оставшихся после фильтрации в частотной области изображения. Для определения параметров контура визирной цели с помощью формул Спрэгга была решена оптимизационная задача по вычислению минимума гладкой целевой функции:

$$\min_{x, y, R} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r_0 \right)^2.$$

В результате значение среднего радиуса контура визирной цели на изображении уменьшилось до $r_0 \approx 130,86$ пкс, также были найдены координаты центра окружности, аппроксимирующей контур визирной цели на изображении: $(x_0, y_0) \approx (130,52, 137,97)$ пкс.

Сравнительная оценка параметров визирной цели проводилась с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [17], в соответствии с которым радиус и координаты центра визирной цели вычислялись согласно выражениям

$$R_{\text{МНК}} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + \frac{\sum x^2 + \sum y^2 - 2(x_0 \sum x + y_0 \sum y)}{n}};$$

$$x_0 = (w_1 n_{22} - w_2 n_{12}) / \det N; \quad y_0 = (w_2 n_{11} - w_1 n_{21}) / \det N,$$

где w_i, n_{ij} — элементы введенных для упрощения матриц W и N , определяемых выражениями

$$W = \begin{bmatrix} \sum x^3 + \sum xy^2 - \frac{1}{n} \sum x^2 \sum x - \frac{1}{n} \sum y^2 \sum x \\ \sum x^2 y + \sum y^3 - \frac{1}{n} \sum x^2 \sum y - \frac{1}{n} \sum y^2 \sum y \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 2 \left(\sum x^2 - \frac{1}{n} \sum x \sum x \right) & 2 \left(\sum xy - \frac{1}{n} \sum x \sum y \right) \\ 2 \left(\sum xy - \frac{1}{n} \sum x \sum y \right) & 2 \left(\sum y^2 - \frac{1}{n} \sum y \sum y \right) \end{bmatrix}.$$

Отклонение формы контура визирной цели на изображении от формы аппроксимирующей окружности (рис. 5) определялось на основании смещенной оценки дисперсии точек контура:

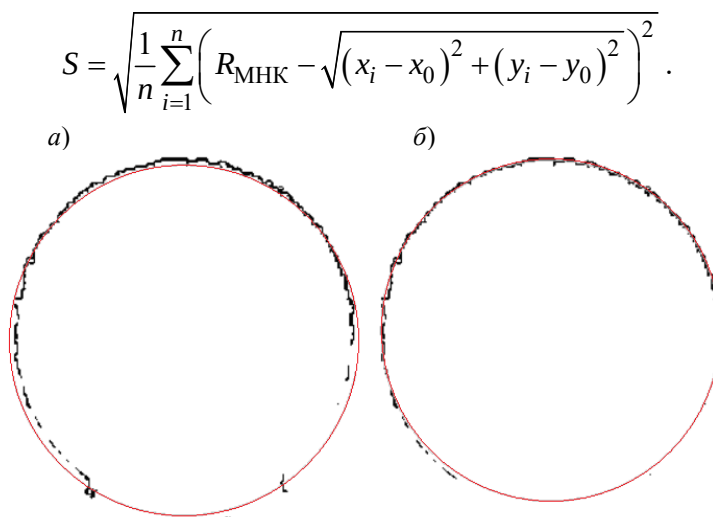


Рис. 5

Смещенная оценка дисперсии точек контура относительно параметров визирной цели, определенных частотным методом (рис. 5, б), уменьшилась в 2,85 раза (с 6,3 до 2,21) по сравнению с оценкой этих параметров, полученных методом наименьших квадратов (рис. 5, а). Погрешность определения угловых координат визирной цели уменьшилась на 0,71". По сравнению с погрешностью измерения, вносимой геодезическими приборами, данная погрешность (в соответствии с ГОСТ Р 51774-2001) является существенной и более чем в три раза превышает максимальную допустимую погрешность измерения углов тахеометром технического класса точности. Таким образом, применение изложенных методов цифровой обработки изображений в частотной области позволило выявить и устранить значительную погрешность измерения параметров визирной цели.

Заключение. Рассмотренные методы цифровой обработки изображений в частотной области применимы для различных типов оптических систем и направлены в первую очередь на повышение точности определения размера и координат визирных целей на изображении. Основной упор был сделан на дискретный метод преобразования Фурье и его особенности, связанные с обработкой контура визирной цели на изображении. Данное преобразование стало возможным благодаря представлению контура визирной цели в виде профилограммы относительно средней окружности, аппроксимирующей точки контура. Такой подход позволил представить изображение в комплексной плоскости и описать его с помощью совокупности составляющих частот. В результате были получены характеристики рассеяния случайной составляющей погрешности измерения координат центра контура и выявлены погрешности измерения параметров визирной цели на изображении.

Таким образом, применение частотных методов цифровой обработки изображений позволяет повысить точность определения координат визирной цели и способствует увеличению дальности проведения бесконтактных измерений с помощью различных оптических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. СПб: Ун-т ИТМО, 2017. 169 с.
2. Роцин Д. А. Погрузка гусеничной техники своим ходом на автоприцеп: управление с помощью системы технического зрения // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 23—29. DOI 10.32446/0368-1025it.2022-1-23-29.
3. Jinwoo K., Seokho Ch., Jongwon S. Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks // Automation in Construction. 2018. Vol. 87. P. 297—308. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.016.

4. Роцин Д. А. Применение системы машинного зрения для контроля пространственного положения строительной техники // Измерительная техника. 2022. № 3. С. 29—35. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-3-29-35.
5. Виноградов А. В., Войтенко А. В. Современные технологии геодезических изысканий: Учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2012. 111 с.
6. Song Y., Fan R., Huang S. et al. A three-stage real-time detector for traffic signs in large panoramas // Computational Visual Media. 2019. N 5. P. 403—416. DOI:10.1007/s41095-019-0152-1.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
8. Di Zenzo S. A note on the gradient of a multi-image // Computer vision, Graphics, and Image Processing. 1986. Vol. 33, N 1. P. 116—125.
9. Гебель И. Д. Инвариантные свойства отклонения профиля от круглой формы // Измерительная техника. 1978. № 11. С. 16—19.
10. Гебель И. Д. Выбор базовой окружности при измерении формы профиля тел вращения // Измерительная техника. 1971. № 10. С. 20—24.
11. Шилин А. Н. Анализ методов и схем измерения геометрических параметров обечаек в процессе их формообразования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 9. С. 44—52.
12. Авдулов А. Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1974. 175 с.
13. Spragg R. C. Accurate calibration of Surface Texture and roundness Measuring Instruments // Proc. Institution of Mech. Engineers. 1967—1968. Vol. 182. Part 3k. P. 497.
14. Spragg R. C., Whitehouse D. J. New Unified Approach to Surface Metrology // Proc. Institution of Mech. Engineers. 1970—1971. Vol. 185. P. 47—71.
15. Гаврилова А. Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1973. 567 с.
16. Сизенов Л. К. Суммирование погрешностей размеров и формы в поперечном сечении цилиндрических деталей // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1969. № 11. С. 134—138.
17. Gander W., Golub G. H., Strebel R. Least-squares fitting of circles and ellipses // BIT. 1994. Vol. 34, N 4. P. 558—578. DOI:10.1007/BF01934268.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|---|
| Александр Николаевич Шилин | — д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электроники; зав. кафедрой;
E-mail: eltech@vstu.ru |
| Дмитрий Александрович Роцин | — канд. техн. наук; НИИЦ Железнодорожных войск;
E-mail: whwhwh@mail.ru |

Поступила в редакцию 01.09.22; одобрена после рецензирования 11.11.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Vlasov S.M., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V. *Beskontaktnyye sredstva lokal'noy oriyentatsii robotov* (Non-Contact Means of Local Orientation of Robots), St. Petersburg, 2017, 169 p. (in Russ.)
2. Roshchin D.A. *Measurement Techniques*, 2022, no. 1, pp. 24–32.
3. Jinwoo K., Seokho Ch., Jongwon S. *Automation in Construction*, 2018, vol. 87, pp. 297–308, DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.016.
4. Roshchin D.A. *Measurement Techniques*, 2022, no. 3, pp. 180–187.
5. Vinogradov A.V., Voitenko A.V. *Sovremennyye tekhnologii geodezicheskikh izyskaniy* (Modern Technologies of Geodetic Surveys), Omsk, 2012, 111 p. (in Russ.)
6. Song Y., Fan R., Huang S. et al. *Computational Visual Media*, 2019, no. 5, pp. 403–416, DOI:10.1007/s41095-019-0152-1.
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2008, 954 p.
8. Di Zenzo S. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1986, no. 1(33), pp. 116–125.
9. Gebel' I.D. *Measurement Techniques*, 1978, no. 11, pp. 1495–1500.
10. Gebel' I.D. *Measurement Techniques*, 1971, no. 10, pp. 1485–1492.
11. Shilin A.N. *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2002, no. 9, pp. 44–52. (in Russ.)
12. Avdulov A.N. *Kontrol' i otsenka kruglosti detaley mashin* (Control and Evaluation of the Roundness of Machine Parts), Moscow, 1974, 175 p. (in Russ.)

13. Spragg R.C. *Proc. Instr. Mech. Engrs.*, 1967–1968, vol. 182, pt. 3k, pp. 497.
14. Spragg R.C., Whitehouse D.J. *Proc. Instr. Mech. Engrs.*, 1970–1971, vol. 185, pp. 47–71.
15. Gavrilova A.N. *Tochnost' proizvodstva v mashinostroyenii i priborostroyenii* (Production Precision in Mechanical Engineering and Instrumentation), Moscow, 1973, 567 p. (in Russ.)
16. Sizenov L.K. *Journal of Instrument Engineering*, 1969, no. 11, pp. 134–138. (in Russ.)
17. Gander W., Golub G.H., Strebel R. *BIT*, 1994, no. 4(34), pp. 558–578, DOI:10.1007/BF01934268.

Data on authors

- Aleksander N. Shilin** — Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Electronics; Head of the Department; E-mail: eltech@vstu.ru
- Dmitry A. Roshchin** — PhD; Research and Testing Center of the Railway Troops; E-mail: whwhwh@mail.ru

Received 01.09.22; approved after reviewing 11.11.22; accepted for publication 25.01.23.

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

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

УДК 519.876.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-210-222

**ТЕСТИРОВАНИЕ ИК-СЕНСОРОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА ЭТАЛОННЫХ ТЕПЛОВЫХ СИГНАЛОВ**

Е. В. ЛАРКИН¹, Д. В. ТИТОВ², Т. А. АКИМЕНКО^{1*}, Т. А. ШИРАБАКИНА²

¹Тульский государственный университет, Тула, Россия

*tantan72@mail.ru

²Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

Аннотация. Исследуются методы тестирования ИК-сенсоров, широко применяемых как источник информации об окружающей среде в различных отраслях народного хозяйства. Показано, что вследствие преобразования сенсором информативных параметров наблюдаемой сцены возможны потери информации на выходе прибора. Определены условия, при которых потерь информации не происходит, и три общих случая передачи информативных параметров с потерями. Разработана структура тестирующей системы, основным элементом которой является запатентованный генератор эталонных тестовых сигналов, позволяющий оценивать такие информативные параметры, как теплосигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность. Теплосигнальная характеристика строится в результате сканирования нагреваемых пластин, статистической обработки результатов измерений и аппроксимации результатов статистической обработки линейной зависимостью. Дисторсия оценивается по результатам измерения координат ИК-светодиодов на сцене генератора эталонных тестовых сигналов. Разрешающая способность оценивается по результатам построения поверхности значений выходного сигнала ИК-сенсора при сканировании тепловыделяющих пластин. Для каждого случая предлагается соответствующая методика оценивания.

Ключевые слова: инфракрасный сенсор, генератор тепловых сигналов, информативные параметры, потери информации, теплосигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность

Ссылка для цитирования: Ларкин Е. В., Титов Д. В., Акименко Т. А., Ширабакина Т. А. Тестирование ИК-сенсоров с использованием генератора эталонных тепловых сигналов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 210—222. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-210-222.

TESTING OF IR SENSORS USING A REFERENCE THERMAL SIGNAL GENERATOR

E. V. Larkin¹, D. V. Titov², T. A. Akimenko^{1*}, T. A. Shirabakina²

¹Tula State University, Tula, Russia

*tantan72@mail.ru

²Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract. Methods for testing IR sensors, which are widely used as a source of information about the environment in various sectors of the national economy, are being investigated. It is shown that due to the transformation of the informative parameters of the observed scene by the sensor, information loss at the output of the device is possible. Conditions are derived under which there is no loss of information, and three general cases of transmission of informative parameters with losses are specified. The structure of the testing system is developed, the main element of which is a patented generator of reference test signals, which makes it possible to evaluate such informative parameters as a thermal signal characteristic, distortion, and resolution. The heat signal characteristic is built as a result of heated plates scanning, statistical processing of measurement data, and approximation of the results of statistical processing by a linear dependence. Distortion is inferred from results of measuring the IR LEDs coordinates in the scene created with the

reference test signals generator. The resolution is estimated based on the results of constructing the surface of values of the output signal of the IR sensor when scanning the heat-generating plates. For each case, an appropriate assessment methodology is proposed.

Keywords: infrared sensor, thermal signal generator, informative parameters, information loss, heat signal characteristic, distortion, resolution

For citation: Larkin E. V., Titov D. V., Akimenko T. A., Shirabakina T. A. Testing of IR sensors using a reference thermal signal generator. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 210—222 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-210-222.

Введение. Системы наблюдения сцен, работающие в инфракрасном (ИК) диапазоне, в настоящее время широко используются в различных отраслях народного хозяйства [1—4]. Основным преимуществом подобных систем является возможность работы в сложных эксплуатационных условиях, таких как недостаточное освещение объектов наблюдения в видимом диапазоне электромагнитных излучений, повышенная влажность, туман, задымленность. В качестве элемента, преобразующего электромагнитное излучение в образ сцены, в подобных системах применяются ИК-сенсоры, формирующие видеосигнал, передаваемый на пункт наблюдения и управления, где полученная информация воспринимается и интерпретируется человеком-оператором или системой искусственного интеллекта. Эффективность функционирования рассматриваемых систем во многом определяется техническими характеристиками ИК-сенсоров, которые должны оставаться стабильно высокими длительное время в широком диапазоне условий наблюдения сцены, поскольку информацию, утраченную на этапе первичного формирования теплового образа сцены, путем дальнейшей цифровой обработки изображений восстановить затруднительно.

Верификация сенсоров осуществляется системой тестирования, создающей тестовые ИК-образы сцен, позволяющие проводить измерение и оценку параметров основных узлов и блоков ИК-сенсора и сенсора в целом [5—8]. Подобный подход, основанный на создании эталонных тестовых сигналов, широко применяется в телевидении, при микрофильмировании и сканировании документов [9—13] и в других информационных системах. Однако контроль основных параметров ИК-сенсоров имеет свою специфику, связанную с тем, что тест-объект должен генерировать, а не преобразовывать тепловые образы эталонной сцены, что представляет собой известные технические трудности.

Таким образом, наличие потребности в создании информационно-измерительной системы, обеспечивающей оценку качества ИК-сенсоров, и отсутствие общей теории анализа и расчета параметров подобных систем объясняет необходимость и актуальность проведенных исследований.

Общая структура системы. Для оценки потерь информации в ИК-сенсоре используется цифровая тестирующая информационно-измерительная система, общая структура которой показана на рис. 1 [14, 15]. В тестирующей системе эталонный тестовый сигнал, включающий информативные признаки $x^1, \dots, x^m, \dots, x^M$, поступает с наблюдаемой реальным и виртуальным ИК-сенсорами сцены. В реальном приборе преобразование сигнала $\varphi(x^1, \dots, x^m, \dots, x^M)$ осуществляется узлами и блоками на физическом уровне, вследствие чего формируются реальные вторичные информативные признаки $X_R^1, \dots, X_R^m, \dots, X_R^M$. В виртуальном приборе на основе информативных признаков $x^1, \dots, x^m, \dots, x^M$ формируются желаемые значения вторичных информативных признаков $X_V^1, \dots, X_V^m, \dots, X_V^M$, которые соответствуют идеально настроенному сенсору. Нормы разностей виртуальных и реальных вторичных признаков

сравниваются с допустимыми значениями $\|X_R^m - X_V^m\| < \varepsilon_m, 1 \leq m \leq M$, и если неравенство выполняется для всех информативных параметров, то ИК-сенсор считается пригодным к эксплуатации. Если не выполняется хотя бы одно неравенство, то требуется настройка прибора.

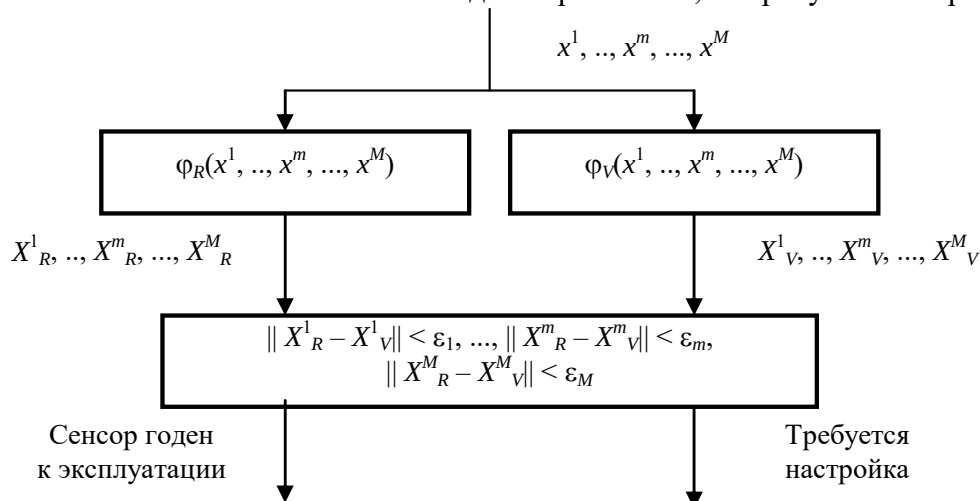


Рис. 1

Преобразование информативных параметров техническими средствами ИК-сенсоров поясняется рис. 2, где применены следующие обозначения: x — значение параметра в относительных единицах, формируемое наблюдаемой сценой, $0 \leq x \leq 1$, X — значение информативного параметра, формируемое на выходе ИК-сенсора.

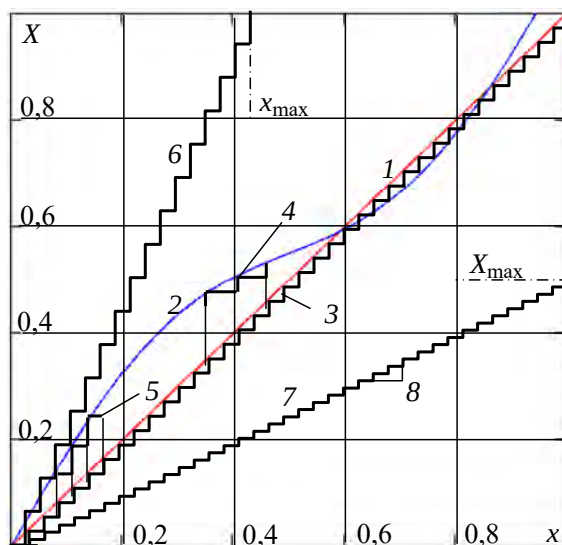


Рис. 2.

В системе без информационных потерь $X = x$, и эта зависимость представляется на рис. 2 прямой 1, имеющей угол наклона 45° . В системе с потерями зависимость выходного значения параметра от исходного значения определяется в виде $X = \varphi(x)$ (кривая 2).

Диапазон $0 \leq x \leq 1$ может быть разбит на K равных отрезков, при этом линейная зависимость $X = x$ представляется ступенчатой линией 3, которая описывается выражением

$$X = K^{-1} \cdot \sum_{k=1}^{K-1} \eta(x - K^{-1} \cdot k), \quad (1)$$

где $\eta(\dots)$ — единичная функция Хевисайда.

Текущий угол наклона кривой $X = \varphi(x)$ определяется производной $\alpha = \arctg\left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)$ и может быть как меньше, так и больше 45° (участки 4 и 5 соответственно). Ступенчатая линия, описываемая зависимостью (1), с интервалами, равными K^{-1} , заменяется ступеньками с интервалами, большими, чем K^{-1} , на участке 4 — по параметру x , а на участке 5 — по параметру X .

Каждому отрезку величиной K^{-1} в соответствие может быть поставлена вероятностная мера согласно гистограмме

$$h_x = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_k & \dots & x_{K-1} \\ p_0 & p_1 & \dots & p_k & \dots & p_{K-1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $K^{-1} \cdot (k-1) \leq x_k \leq K^{-1} \cdot k$; p_k — вероятность появления параметра x со значением x_k ; вероятности p_k не коррелированы между собой; $\sum_{k=0}^{K-1} p_k = 1$.

Количество информации, которое несет в себе параметр x , определяется зависимостью [16]

$$H_x = \sum_{k=0}^{K-1} -p_k \cdot \log p_k. \quad (3)$$

Очевидно, что в системе без потерь информации $H_x = H_X$, а следовательно,

$$h_X = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & \dots & X_k & \dots & X_{K-1} \\ p_0 & p_1 & \dots & p_k & \dots & p_{K-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $K^{-1} \cdot (k-1) \leq X_k \leq K^{-1} \cdot k$; p_k — вероятность появления параметра X со значением X_k .

Потери информации заключаются в уменьшении значения энтропии информативного параметра H_X на выходе ИК-сенсора по сравнению со значением энтропии информативного параметра, формируемого наблюдаемой сценой. Эти потери могут возникать по одной из следующих причин:

- а) сокращение области определения функции $X = \varphi(x)$;
- б) сокращение области значений функции $X = \varphi(x)$ (линия 7);
- с) отклонение функции $X = \varphi(x)$ от линейного вида (участки 4, 5 ступенчатого представления кривой).

Случай „а“ иллюстрируется ступенчатой линией 6. Энтропии параметра x в областях определения $0 \leq x \leq 1$ и $0 \leq x \leq x_{\max} < 1$ равны, соответственно,

$$H_x = \sum_{k=0}^{\tilde{K}} -p_k \cdot \log p_k,$$

где

$$\tilde{K} = \begin{cases} K, & \text{если } 0 \leq x \leq 1; \\ \lceil K \cdot x_{\max} \rceil, & \text{если } 0 \leq x \leq x_{\max} < 1, \end{cases}$$

здесь $\lceil \dots \rceil$ — округление до ближайшего целого в большую сторону.

Естественно, что $H_x(0 \leq x \leq 1) > H_x(0 \leq x \leq x_{\max} < 1)$, и информационные потери для этого случая могут быть оценены как

$$\Delta H_a = H_x(0 \leq x \leq 1) - H_x(0 \leq x \leq x_{\max} < 1) = \sum_{k=0}^K -p_k \cdot \log p_k. \quad (5)$$

Для оценки потерь информации в случаях „b“ и „с“ покажем, что если J стоящих подряд значений информативного параметра, например с k -го по $(k+J-1)$ -й, информационной системой преобразуются в одно значение (участок 4 на кривой 2 и замена нескольких ступенек одной ступенькой 8 на линии 7), то в системе имеются потери информации.

Действительно, количество информации, содержащейся в параметре, формируемом наблюдаемой сценой, в этом случае равно

$$H_{x,J} = \sum_{j=0}^{J-1} (-p_{k+j}) \log p_{k+j}. \quad (6)$$

Все значения информативного параметра преобразуются в одно значение, формируемое на выходе информационной системы, энтропия которого оценивается как

$$H_{X,J} = \left[-\sum_{j=0}^{J-1} p_{k+j} \right] \log \left[\sum_{j=0}^{J-1} p_{k+j} \right]. \quad (7)$$

Положительная разность энтропий (6) и (7) означает наличие информационных потерь [15]

$$\Delta H_J = H_{x,J} - H_{X,J} = \sum_{j=0}^{J-1} p_{k+j} \cdot \log \left[\frac{1}{p_{k+j}} \sum_{l=0}^{J-1} (p_{k+l}) \right]. \quad (8)$$

Выражение, стоящее под знаком логарифма в правой части (8), больше нуля, так как сумма вероятностей больше одной из вероятностей суммы. Следовательно, потери информации в системе в рассматриваемом случае имеются.

Как следует из рис. 2, в случае „b“, представленном ступенчатой линией 7, на каждые J отсчетов параметра x приходится один отсчет параметра X (участок 8). Потери информации в этом случае составляют

$$\Delta H_b = \sum_{n=1}^{[K/J]} \Delta H_{J(n)}, \quad (9)$$

где $\Delta H_{J(n)}$ — оценка потерь информации на n -м участке ступенчатой зависимости, в общем случае разная для различных участков вследствие возможных различий вероятностей на этих участках.

Случай „с“ представлен рис. 3, где показаны все возможные варианты отображения информативного параметра x , формируемого сценой, в информативный параметр X ИК-сенсора.

Для удобства случаи отображения упорядочены следующим образом. Отрезки с x_0 по x_{k-1} соответствуют дискретному представлению участков кривой $X = \varphi(x)$, на которых $X \cong x$, и отображаются в отрезки с X_0 по X_{k-1} . Отображение отрезков с x_k по x_{l-1} при дискретном представлении кривой $X = \varphi(x)$ соответствует случаю, когда $\frac{d\varphi(x)}{dx} < 1$. Отрезки отображаются подмножествами отрезков x в единственный отрезок X таким образом, что подмножество $\{x_k, \dots, x_{k+j(k)-1}, \dots, x_{k+J(k)-1}\}$ отображается в $X_k, \dots$, а подмножество $\{x_{l-J(l)-1}, \dots, x_{l-j(l)-1}, \dots, x_{l-1}\}$ отображается в X_{l-1} . Отображение отрезков с x_l по x_{K-1} при дискретном представлении кривой $X = \varphi(x)$ соответствует случаю, когда $\frac{d\varphi(x)}{dx} > 1$. Отрезки отображаются в подмножества отрезков таким образом, что x_l отображается в подмножество

$\{X_l, \dots, X_{l+j(l)-1}, \dots, X_{l+J(l)-1}\}, \dots$, а x_{K-1} отображается в подмножество $\{X_{K-J(K-1)-1}, \dots, X_{K-j(K-1)-1}, \dots, X_{K-1}\}$.

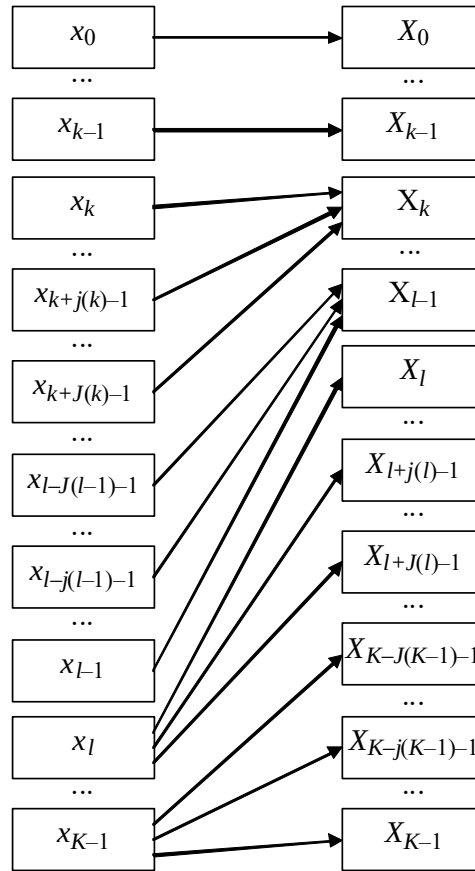


Рис. 3

Потери информации при отображении информативного параметра на отрезках с x_0 по x_{k-1} равны нулю (см. рис. 3). При отображении информативного параметра отрезков с x_l по x_{K-1} каждый из указанных отрезков представляется одним единственным элементом подмножеств $\{X_l, \dots, X_{l+j(l)-1}, \dots, X_{l+J(l)-1}\}, \{X_{K-J(K-1)-1}, \dots, X_{K-j(K-1)-1}, \dots, X_{K-1}\}$. Именно этот элемент представляет информативный параметр на выходе ИК-сенсора. Вероятности появления в сообщении других элементов множества равны нулю, поэтому потерь информации в этом смысле не происходит, т.е. $x_l, \dots, x_{K-1}$ отображаются в $\tilde{X}_l, \dots, \tilde{X}_{K-1}$, где $\tilde{X}_l \in \{X_l, \dots, X_{l+j(l)-1}, \dots, X_{l+J(l)-1}\}, \dots, \tilde{X}_{K-1} \in \{X_{K-J(K-1)-1}, \dots, X_{K-j(K-1)-1}, \dots, X_{K-1}\}$.

Таким образом, потери информации для случая „с“ полностью определяются потерями информации на участках, где $\frac{d\varphi(x)}{dx} < 1$, и равны

$$\Delta H_c = \sum_{i=k}^{l-1} \Delta H_{J(i)}, \quad (10)$$

где $\Delta H_{J(i)}$ — потери информации при замене подмножества отрезков $\{x_i, \dots, x_{i+j(i)-1}, \dots, x_{i+J(i)-1}\}$ отрезком X_i , определяемые по зависимости (8).

Техническая реализация тестирующей системы. Информативными параметрами ИК-сенсоров, подлежащими тестированию, являются теплосигнальная характеристика, дисторсия и разрешающая способность. Для оценки потерь, возникающих на выходе ИК-сенсоров при преобразованиях перечисленных информативных параметров, предлагается использовать генератор эталонных тепловых сигналов (ГЭТС), структурная схема которого приведена на рис. 4 [8], где генератор представлен в системе координат yOz , связанной со сценой и расположенной в предметной плоскости объектива ИК-сенсора. В состав ГЭТС входят: 1 — пластины из токопроводящего материала, на которые установлены датчики 2 температуры t_1° , t_2° , а сами пластины размещены на охлаждающих элементах 3; инфракрасные светодиоды 4₁—4₈, размещенные по краям наблюдаемой сцены; блок управления 5, на который подаются сигналы t_1° , t_2° . С блока управления 5 подаются управляющие сигналы u_{11} , u_{12} , u_{21} , u_{22} на токопроводящие пластины 1, охлаждающие элементы 3 и инфракрасные светодиоды 4₁—4₈. Токопроводящие пластины расположены под углом α друг к другу, что позволяет измерять пространственное разрешение ИК-сенсора.

При тестировании ГЭТС сканируется сенсором, на выходе которого формируется цифровой образ сцены, представляющий собой факсимильную цифровую модель изображения (ФЦМИ) $V = [v_{i(y),i(z)}]$, где $i(y), i(z)$ — индексы ФЦМИ, обозначающие номера строк и столбцов матрицы и привязанные к пространственным координатам y и z соответственно. Потери информации оцениваются по результатам анализа ФЦМИ.

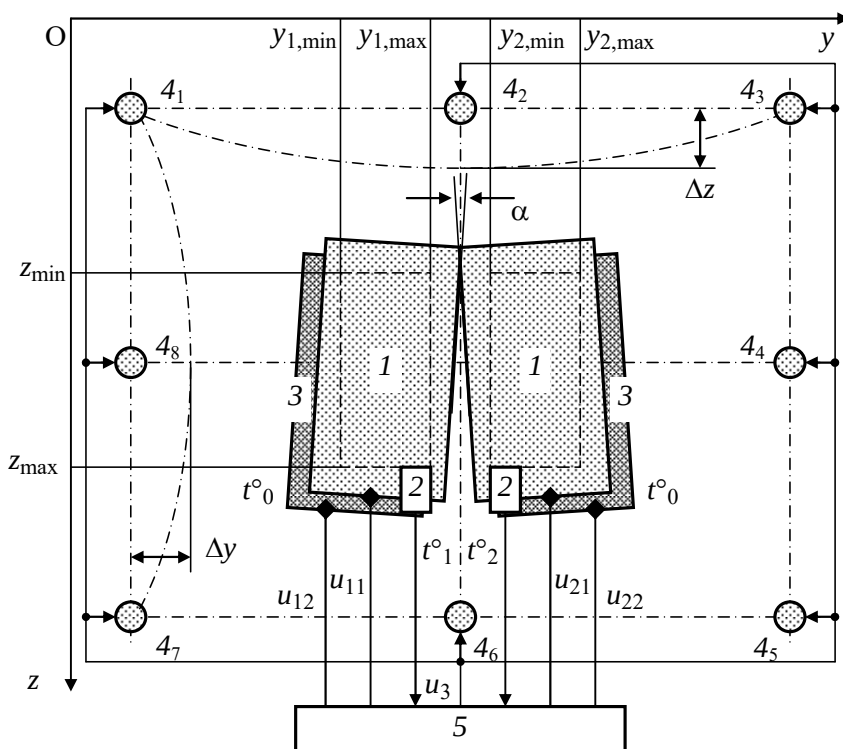


Рис. 4

Теплосигнальная характеристика ИК-сенсора, т.е. зависимость $v(t^\circ)$, с использованием ГЭТС измеряется следующим образом. На охлаждающие элементы 3 с блока управления 5 подаются сигналы u_{12} , u_{22} , в результате чего эти элементы создают необходимую фоновую температуру t_0° , относительно которой блок управления 5, используя в качестве обратной связи показания t_1° , t_2° датчиков 2, устанавливает заданные значения температуры $t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)$

участков $[y_{1,\min} \leq i(y) \leq y_{1,\max}, z_{\min} \leq i(z) \leq z_{\max}]$, $[y_{2,\min} \leq i(y) \leq y_{2,\max}, z_{\min} \leq i(z) \leq z_{\max}]$, выделенных на рис. 4 штрихпунктирной линией. По результатам измерения определяются математическое ожидание и дисперсия значений пикселей по зависимостям [17]

$$\begin{aligned} \tilde{v}(n) = & \left\{ [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] + \right. \\ & \left. + [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] \right\}^{-1} \times \\ & \times \left[\sum_{i(y)=i(y_{1,\min})}^{i(y_{1,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} v_{i(y),i(z)}(n) + \sum_{i(y)=i(y_{2,\min})}^{i(y_{2,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} v_{i(y),i(z)}(n) \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D(n) = & \left\{ [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] + \right. \\ & \left. + [i(y_{1,\max}) - i(y_{1,\min}) + 1] [i(z_{\max}) - i(z_{\min}) + 1] - 1 \right\}^{-1} \times \\ & \times \left\{ \sum_{i(y)=i(y_{1,\min})}^{i(y_{1,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} [v_{i(y),i(z)}(n) - \tilde{v}(n)]^2 + \right. \\ & \left. + \sum_{i(y)=i(y_{2,\min})}^{i(y_{2,\max})} \sum_{i(z)=i(z_{\min})}^{i(z_{\max})} [v_{i(y),i(z)}(n) - \tilde{v}(n)]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $i(y)$, $i(z)$ — дискретные координаты, соответствующие аналоговым координатам y и z ; $i(y_{1,\min})$ и $i(y_{1,\max})$ — минимальное и максимальное значения дискретной координаты, соответствующие аналоговым координатам $y_{1,\min}$ и $y_{1,\max}$ левой нагреваемой пластины; $i(y_{2,\min})$ и $i(y_{2,\max})$ — минимальное и максимальное значения дискретной координаты, соответствующие аналоговым координатам $y_{2,\min}$ и $y_{2,\max}$ правой нагреваемой пластины; $i(z_{\min})$ и $i(z_{\max})$ — минимальное и максимальное значения дискретной координаты, соответствующие аналоговым координатам $z_{\min}$ и $z_{\max}$ нагреваемых пластин.

В случае если хотя бы для одного значения $t^\circ(n)$ не выполняется неравенство $\sqrt{D(n)} < \varepsilon_1$, где ε_1 — наибольшее допустимое среднеквадратическое отклонение результатов измерения температуры, ИК-сенсор считается не прошедшим тестовую проверку.

В результате проведения тестовых испытаний ИК-сенсора для разных температур нагрева пластин 1 формируются два массива данных: массив температур $[t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)]$, для которых проводилось тестирование, и массив значений $[\tilde{v}(1), \dots, \tilde{v}(n), \dots, \tilde{v}(N)]$ по результатам измерения температур сенсором. В случае если в ИК-сенсоре реализована логарифмическая теплосигнальная характеристика, то массив температур должен быть преобразован в массив логарифмов температур следующим образом:

$$\begin{aligned} [t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)] & \rightarrow \left[\ln \frac{t^\circ(1)}{t_0^\circ}, \dots, \ln \frac{t^\circ(n)}{t_0^\circ}, \dots, \ln \frac{t^\circ(N)}{t_0^\circ} \right] = \\ & = [\tilde{t}^\circ(1), \dots, \tilde{t}^\circ(n), \dots, \tilde{t}^\circ(N)]. \end{aligned} \quad (13)$$

В случае если шкала является пропорциональной, то

$$[t^\circ(1), \dots, t^\circ(n), \dots, t^\circ(N)] = [\tilde{t}^\circ(1), \dots, \tilde{t}^\circ(n), \dots, \tilde{t}^\circ(N)]. \quad (14)$$

Сглаживание экспериментальной зависимости $\tilde{v}(\tilde{t}^\circ)$ по методу наименьших квадратов [18, 19] дает

$$\tilde{v} = a\tilde{t}^\circ + b, \quad (15)$$

где

$$a = \frac{N \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \tilde{v}(n) - \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \sum_{n=1}^N \tilde{v}(n)}{n \sum_{n=1}^N [\tilde{t}^\circ(n)]^2 - \left(\sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \right)^2},$$

$$b = \frac{\sum_{n=1}^N [\tilde{t}^\circ(n)]^2 \sum_{n=1}^N \tilde{v}(n) - \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \tilde{v}(n)}{n \sum_{n=1}^N [\tilde{t}^\circ(n)]^2 - \left(\sum_{n=1}^N \tilde{t}^\circ(n) \right)^2}.$$

Сенсор считается не прошедшим тестовую проверку, если $\|a - a_s\| < \varepsilon_2$, где a и a_s — соответственно эталонное и измеренное значения коэффициента передачи, ε_2 — наибольшее допустимое отклонение коэффициента передачи от эталонного значения. Также сенсор считается непригодным для эксплуатации, если ошибка аппроксимации $\tilde{v}(\tilde{t}^\circ)$ прямой (15) больше порогового значения, а именно

$$\sum_{n=1}^N \|\tilde{v}(n) - a\tilde{t}^\circ(n) - b\| > \varepsilon_3,$$

где $\|\dots\| = (\dots)^2$, ε_3 — максимально допустимая ошибка аппроксимации теплосигнальной характеристики.

Дисторсия ИК-сенсора определяется по отклонению центров тепловых образов инфракрасных светодиодов 4_1 — 4_8 от прямых, соединяющих центры образов угловых светодиодов. Для этого с блока управления 5 подается сигнал u_3 , включающий все светодиоды. Сцена сканируется, и формируется ФЦМИ, на которой имеются только тепловые образы фона и светодиодов. Далее ФЦМИ подвергается бинаризации и фильтрации медианным фильтром [20, 21], в результате чего формируется бинарный образ светодиода, j -я строка которого состоит из цепочки единиц с индексами $i_{\min}(j) \leq i(j) \leq i_{\max}(j)$. Аналогично i -й столбец бинарного образа светодиода включает цепочки единиц с индексами $j_{\min}(i) \leq j(i) \leq j_{\max}(i)$. Весь образ вписывается в прямоугольник с координатами $I_{\min} \leq i \leq I_{\max}$, $J_{\min} \leq j \leq J_{\max}$, где $I_{\min} = \min_j [i_{\min}(j)]$, $I_{\max} = \max_j [i_{\max}(j)]$, $J_{\min} = \min_i [j_{\min}(i)]$, $J_{\max} = \max_i [j_{\max}(i)]$. Общее количество пикселей, формирующих образ светодиода, равно

$$N_\Sigma = \sum_{j=J_{\min}}^{J_{\max}} \{i_{\max}(j) - i_{\min}(j) + 1\}.$$

Координаты центра бинарного образа светодиода определяются как координаты его центра масс следующим образом:

$$y^* = \frac{1}{N_\Sigma} \sum_{i=I_{\min}}^{I_{\max}} i \cdot \frac{j_{\max}(i) + j_{\min}(i)}{2} \cdot \{j_{\max}(i) - j_{\min}(i) + 1\}, \quad (16)$$

$$z^* = \frac{1}{N_{\Sigma}} \sum_{j=J_{\min}}^{J_{\max}} j \cdot \frac{i_{\max}(j) + i_{\min}(j)}{2} \cdot \{i_{\max}(j) - i_{\min}(j) + 1\}. \quad (17)$$

После определения центров тепловых образов светодиодов производится проверка условий

$$\varepsilon_{4.2} > \left\| \frac{z_1^* + z_3^*}{2} - z_2^* \right\|; \varepsilon_{4.4} > \left\| \frac{y_3^* + y_5^*}{2} - y_4^* \right\|; \varepsilon_{4.6} > \left\| \frac{z_5^* + z_7^*}{2} - z_6^* \right\|; \varepsilon_{4.8} > \left\| \frac{y_1^* + y_7^*}{2} - y_8^* \right\|, \quad (18)$$

где $\varepsilon_{4.m}$, $m = 2, 4, 6$, — максимально допустимое расстояние от центра образа m -го светодиода до линии, проходящей через центры образов $(m-1)$ -го и $(m+1)$ -го светодиодов; $\varepsilon_{4.8}$ — максимально допустимое расстояние от центра образа восьмого светодиода до линии, проходящей через центры образов седьмого и первого светодиодов; y_m^* , z_m^* , $m = 1, \dots, 8$, — координаты центра бинарного образа m -го светодиода.

При невыполнении хотя бы одного из условий (18) ИК-сенсор считается непригодным к эксплуатации.

Контроль разрешающей способности ИК-сенсора иллюстрируется рис. 5, где показано, что сигнал $v(y, z)$, в безразмерных единицах, формируется на выходе прибора при сканировании участка сцены, состоящей из двух токопроводящих пластин, развернутых друг относительно друга на малый угол α . Пластины нагреваются до некоторой температуры, по которой на выходе сенсора формируется сигнал $v_{\max} = 1$. Вследствие того, что оптико-электронная подсистема сенсора является пространственным фильтром [22], сигнал на его выходе может быть описан выражением

$$v(y, z) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta}} \left\{ \int_{-\infty}^y \exp \left[-\frac{(\xi - \alpha z)^2}{2\beta} \right] d\xi - \int_{-\infty}^y \exp \left[-\frac{(\xi + \alpha z)^2}{2\beta} \right] d\xi \right\}, \quad (19)$$

где β — параметр, определяющий полосу пропускания фильтра и зависящий от частотно-контрастной характеристики оптической системы ИК-сенсора; $\alpha \rightarrow 0$ — угол разворота пластин; ξ — вспомогательная переменная.

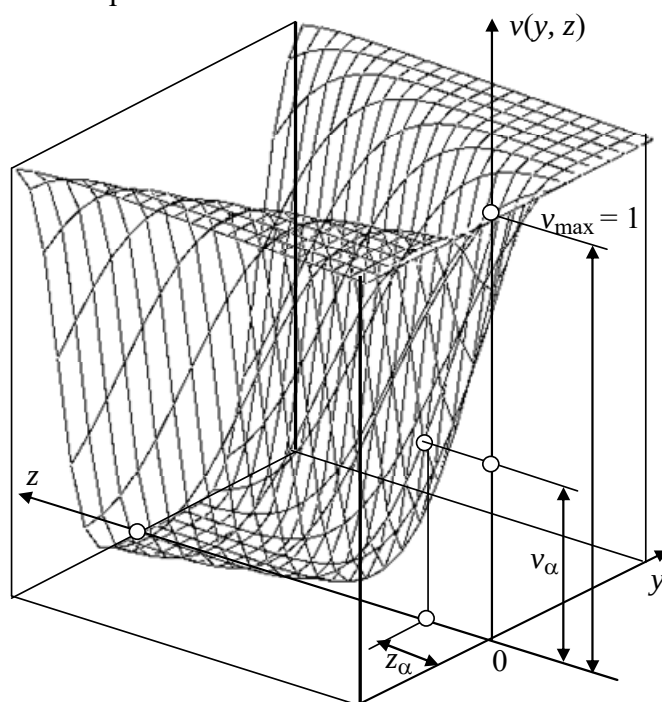


Рис. 5

Функция (19) позволяет оценивать изменение разрешения ИК-сенсора при изменении координаты z . При $z \rightarrow 0$ и $y = 0$ сигнал $v(y, z) \rightarrow 1$ (нулевое разрешение); при $z \rightarrow \infty$ и $y = 0$ сигнал $v(y, z) \rightarrow 0$ (максимальное разрешение). Информационные потери в данном случае возникают вследствие сокращения динамического диапазона параметра $v(y, z)$. Очевидно, что значение v_α функции (19) при некоторой критической величине z_α может характеризовать граничную разрешающую способность сенсора.

Из вышеизложенного следует, что при контроле разрешающей способности необходимо сканировать тест-объект в направлении y , перпендикулярном осевой линии расположения токопроводящих пластин 1 для различных значений координаты z (см. рис. 4). При каждом сканировании в точке расположения осевой линии необходимо определять значение функции (19). При появлении значения функции, равного v_α , необходимо определять z_α , при котором это произошло. Если $z_\alpha > \varepsilon_5$, где ε_5 — граничное расстояние от точки с нулевым разрешением до точки с критическим разрешением, то требуется настройка сенсора, в противном случае ИК-сенсор годен к эксплуатации.

Заключение. Предложен подход к тестированию сенсоров, работающих в ИК-диапазоне, основанный на физической генерации теплового тестового сигнала и оценке потерь, возникающих при формировании ИК-сенсором образа тест-объекта. Показано, что при линейной зависимости информативных параметров сигнала, получаемого на выходе прибора, от параметров сигнала, генерируемого наблюдаемой сценой, потерь информации не происходит. При нелинейной зависимости возникают потери, величину которых можно оценить при соответствующей цифровой обработке выходного сигнала сенсора.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на создание системы автоматического контроля параметров ИК-сенсоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2000. 252 с.
2. Основы инфракрасной термографии / А. В. Афонин, Р. К. Ньюпорт и др.; Под ред. Р. К. Ньюпорта, А. И. Таджибаева. СПб: Изд-во ПЭИПК, 2004. 240 с.
3. Бугаенко А. Г., Белозеров А. Ф., Митряйкин В. И. Опытный учебно-тренировочный и научный центр по тепловидению // Оптич. вестн.: Бюл. оптического общества им. Д. С. Рождественского. 2002. № 105. С. 8—11.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
5. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов / В. П. Иванов, В. И. Курт, В. А. Овсянников, В. Л. Филиппов. Казань: Отечество, 2006. 594 с.
6. Балоев В. А., Курт В. И., Щипунов А. Н. Направления совершенствования отраслевой системы метрологического обеспечения инфракрасных оптико-электронных приборов // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 3. С. 5—13.
7. Пат. 191285 РФ. Устройство тестирования разрешения тепловизоров по контрасту / Т. А. Акименко, Е. В. Ларкин, О. А. Лучанский, Е. В. Филиппова. Оpubл. 01.08.2019. Бюл. № 22.
8. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Исследование статических характеристик и пространственной динамики тепловизионной системы наблюдения // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. 2018. № 9. С. 497—500.
9. Испытательные таблицы для измерения качества цифрового и аналогового телевизионного вещания // Журн. „625“. 1999. № 8. С. 36—42.
10. Boiangiu C. A., Dvornic A. I. Methods of bitonal image conversion for modern and classic documents // WSEAS Trans. on Computers. 2008. Vol. 7, N 7. P. 1081—1090.

11. ISO 12653-1:2000. Electronic imaging — Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 1: Characteristics.
12. ISO 12653-2:2000. Electronic imaging — Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 2: Method of use.
13. ISO 12653-3:2014. Electronic imaging — Test target for scanning of office documents. Part 3: Test target for use in lower resolution applications.
14. Testing Image Synthesis for Scanners Verification / E. Larkin, V. Kotov, N. Kotova, A. Privalov // 2nd Intern. Ural Conf. on Measurements (URALCON). Chelyabinsk, Russia: South Ural State University, 2017. P. 221—226.
15. Larkin E. V., Kotov V. V., Kotova N. A., Privalov A. N. Method of Estimation of Scanning System Quality // 10th Intern. Conf. on Machine Vision (ICMV): Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10696. Article Number: UNSP 106962N.
16. Gray R. M. Entropy and Information Theory. Springer. 2011. 409 p.
17. Jaynes E. T. Probability Theory: The Logic of Science / Ed. G. L. Bretthorst. Cambridge Univ. Press, 2003. 753 p.
18. Maronna R. M., Victor J., Yohai V. J. Robust functional linear regression based on splines // Computational Statistics & Data Analysis. 2013. Vol. 65. P. 46—55.
19. Muler N., Yohai V. J. Robust estimation for vector autoregressive models // Computational Statistics & Data Analysis. 2013. Vol. 65. P. 68—79.
20. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. Prentice Hall Publ., 2002. 1040 p.
21. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
22. Papoulis A. Systems and Transforms with Applications in Optics. NY: McGraw-Hill Book Co., 1968. 474 p.

Сведения об авторах

- | | |
|--------------------------------------|---|
| Евгений Васильевич Ларкин | — д-р техн. наук, профессор; Тульский государственный университет, кафедра робототехники и автоматизации производства; заведующий кафедрой; E-mail: elarkin@mail.ru |
| Дмитрий Витальевич Титов | — д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; профессор; E-mail: titov.swsu@gmail.com |
| Татьяна Алексеевна Акименко | — канд. техн. наук, доцент; Тульский государственный университет, кафедра робототехники и автоматизации производства; E-mail: tantan72@mail.ru |
| Тамара Александровна Шибакина | — канд. техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники; профессор; E-mail: tas_06@mail.ru |

Поступила в редакцию 26.07.22; одобрена после рецензирования 10.08.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Aleev P.M., Ivanov V.P., Ovsyannikov V.A. *Osnovy teorii analiza i sinteza vozduшной teplovizionnoy apparatury* (Fundamentals of the Theory of Analysis and Synthesis of Airborne Thermal Imaging Equipment), Kazan, 2000, 252 p. (in Russ.)
2. Afonin A.V., Newport R.K. et al. *Osnovy infrakrasnoy termografii* (Fundamentals of Infrared Thermography), St. Petersburg, 2004, 240 p. (in Russ.)
3. Bugayenko A.G., Belozarov A.F., Mitryaykin V.I. *Opticheskiy vestnik, D.S. Rozhdestvenskiy Optical Society*, 2002, no. 105, pp. 8–11. (in Russ.)
4. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnyye sistemy "smotryashchego" tipa* (Infrared Systems of "Looking" Type), Moscow, 2004, 444 p. (in Russ.)
5. Ivanov V.P., Kurt V.I., Ovsyannikov V.A., Filippov V.L. *Modelirovaniye i otsenka sovremennykh teplovizionnykh priborov* (Modeling and Evaluation of Modern Thermal Imaging Devices), Kazan, 2006, 594 p. (in Russ.)
6. Baloev V.A., Kurt V.I., Shchipunov A.N. *Journal of Optical Technology*, 2007, no. 3(74), pp. 152–158.
7. Patent RU 191285, *Ustroystvo testirovaniya razresheniya teplovizorov po kontrastu* (Device for Testing the Resolution of Thermal Imagers by Contrast), T.A. Akimenko, E.V. Larkin, O.A. Luchansky, E.V. Filippova, Published 01.08.2019, Bulletin 22. (in Russ.)
8. Akimenko T.A., Filippova E.V. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2018, no. 9, pp. 497–500. (in Russ.)
9. Dvorkovich A.V., Dvorkovich V.P., Makarov D.G., Novinsky N.B., Sokolov A.Yu. 625, 1999, no. 8, pp. 36–42. (in Russ.)

10. Boiangiu C.A., Dvornic A.I. *WSEAS Transactions on Computers*, 2008, no. 7(7), pp. 1081–1090.
11. ISO 12653-1:2000, *Electronic imaging - Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 1: Characteristics*.
12. ISO 12653-2:2000, *Electronic imaging - Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 2: Method of use*.
13. ISO 12653-3:2014, *Electronic imaging - Test target for scanning of office documents. Part 3: Test target for use in lower resolution applications*.
14. Larkin E., Kotov V., Kotova N., Privalov A. *2nd International Ural Conference on Measurements (URALCON)*, South Ural State University, Chelyabinsk, 2017, pp. 221–226.
15. Larkin E., Kotov V., Kotova N., Privalov A. *10th International Conference on Machine Vision (ICMV)*, Proceedings of SPIE, 2018, vol. 10696, article number UNSP 106962N.
16. Gray R.M. *Entropy and Information Theory*, Springer, 2011, 409 p.
17. Jaynes E.T. *Probability theory: The logic of science*, Cambridge University Press, 2003, 753 p.
18. Maronna R.M., Victor J., Yohai V.J. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2013, vol. 65, pp. 46–55.
19. Muler N., Yohai V.J. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2013, vol. 65, pp. 68–79.
20. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2002, 1040 p.
21. Gashnikov M.V., Glumov N.I., Ilyasova N.Yu. et al. *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy* (Computer Image Processing Methods), Moscow, 2003, 784 p. (in Russ.)
22. Papoulis A. *Systems and transforms with applications in optics*, NY, McGraw-Hill Book Co., 1968, 474 p.

Data on authors

Evgeny V. Larkin	—	Dr. Sci., Professor; Tula State University, Department of Robotics and Automation; Head of the Department; E-mail: elarkin@mail.ru
Dmitry V. Titov	—	Dr. Sci., Associate Professor; Southwest State University, Department of Computer Engineering; Professor; E-mail: titov.swsu@gmail.com
Tatiana A. Akimenko	—	PhD, Associate Professor; Tula State University, Department of Robotics and Automation; E-mail: tantan72@mail.ru
Tamara A. Shirabakina	—	PhD, Professor; Southwest State University, Department of Computer Engineering; Professor; E-mail: tas_06@mail.ru

Received 26.07.22; approved after reviewing 10.08.22; accepted for publication 25.01.23.

**МОДИФИКАЦИЯ ВЛАГОМЕРА
ДЛЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ****М. Н. Лютикова*, А. В. Ридель***Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия***m.lyutikova@mail.ru*

Аннотация. Цель работы — модификация известного влагомера трансформаторного масла путем монтирования термостата на десорбционную колонку с возможностью подъема температуры и изучение степени полноты извлечения воды из матрицы масла. Принцип работы влагомера основан на электрохимическом методе, который включает в себя несколько последовательных этапов: извлечение молекул воды из матрицы масла сухим газом в десорбционной колонке при повышенной температуре, перенос парогазовой фазы сухим газом на чувствительный элемент и последующий электролиз воды. Мерой содержания воды в масле является сила тока, необходимая для электрического разложения воды, поглощенной в единицу времени. Модифицированный влагомер (десорбционная колонка с термостатом), в отличие от стандартного исполнения прибора (десорбционная колонка без термостата), позволяет измерять массовую долю воды в старых окисленных маслах из действующих высоковольтных трансформаторов с более высокой точностью. Результаты исследований показали, что нагрев пробы жидкого диэлектрика до 80 °С приводит к снижению вязкости трансформаторного масла. Данный факт способствует наиболее полному извлечению воды из матрицы изоляционной жидкости. Достоверное измерение массовой доли воды в жидком диэлектрике является одной из важных задач при диагностировании состояния изоляционной системы дорогостоящих высоковольтных трансформаторов.

Ключевые слова: минеральное изоляционное масло, метод Карла Фишера, влагосодержание, электрохимический метод определения воды

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-79-10198 (<https://rscf.ru/project/22-79-10198/>).

Ссылка для цитирования: Лютикова М. Н., Ридель А. В. Модификация влагомера для усовершенствования электрохимического метода определения содержания воды в трансформаторном масле // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 223—233. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-223-233.

**MODIFICATION OF THE MOISTURE METER TO IMPROVE THE ELECTROCHEMICAL METHOD
FOR DETERMINING THE WATER CONTENT
IN TRANSFORMER OIL****M. N. Lyutikova*, A. V. Ridel***Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia***m.lyutikova@mail.ru*

Abstract. The purpose of the work is to modify the known transformer oil moisture meter by mounting a thermostat on the desorption column with the possibility of raising the temperature and to study the degree of completeness of water extraction from the oil matrix. The principle of operation of the moisture meter is based on the electrochemical method, which includes several successive stages: extraction of water molecules from the oil matrix by dry gas in a desorption column at elevated temperature, transfer of the vapor-gas phase by dry gas to a sensitive element, and subsequent electrolysis of water. A measure of the water content in oil is the current strength required for the electrical decomposition of water absorbed per unit time. The modified moisture meter (desorption column with thermostat), in contrast to the standard version of the device (desorption column without thermostat), allows one to measure the mass fraction of water in old oxidized oils from existing high-voltage transformers with higher accuracy. Results of performed research show that heating a liquid dielectric sample to 80 °C leads to a decrease in the viscosity of transformer oil. This fact contributes to the most complete extraction of water from the matrix of the insulating liquid. Reliable measurement of the mass fraction of water in a liquid dielectric is one of the important tasks in diagnosing the state of the insulation system of expensive high-voltage transformers.

Keywords: mineral insulating oil, Karl Fischer method, moisture content, electrochemical method for water determination

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-79-10198 (<https://rscf.ru/project/22-79-10198/>).

For citation: Lyutikova M. N., Ridel A. V. Modification of the moisture meter to improve the electrochemical method for determining the water content in transformer oil. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 223—233 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-223-233.

Введение. Электроэнергетика является одной из крупных отраслей экономики любой страны. Электросетевые предприятия должны обеспечивать надежное бесперебойное распределение и передачу энергии ко всем объектам промышленности. Высококачественное электроснабжение достигается, в том числе, за счет средств и методов превентивной диагностики высоковольтного маслонаполненного оборудования подстанций, задачами которой являются выявление дефектов, вызывающих ухудшение изоляционных свойств материалов вплоть до опасного снижения электрической прочности.

Самой главной и опасной контролируемой примесью в системе „масло — твердая изоляция“ является влага, поскольку в силу своей полярной природы она способна вызывать ухудшение диэлектрических параметров изоляции оборудования [1—3]. Молекулы воды образуются в процессе старения жидкого диэлектрика, а также твердой целлюлозы. Появление повышенного содержания воды в масле, особенно из баков силовых трансформаторов с герметичной пленкой, может указывать на повреждения уплотнений и проникновение влаги извне [4]. Высокое влагосодержание как в масле, так и в твердой целлюлозной изоляции создает риск и угрозу выхода высоковольтного аппарата из строя [5, 6]. Поэтому при обнаружении превышения граничной концентрации воды в изоляционном масле очень важно своевременно провести профилактические мероприятия по ее снижению (сушка, регенерация, очистка, замена масла) и тем самым защитить главную целлюлозную изоляцию от переувлажнения, а значит, обеспечить надежную работу высоковольтного электросетевого оборудования.

С целью контроля поведения воды в системе „масло — целлюлоза“ содержание влаги в жидких диэлектриках (свежие, регенерированные, очищенные, подготовленные к заливу, эксплуатационные масла) строго нормируется в пределах 10—40 ppm (1 ppm = 1 г/т) в зависимости от типа оборудования [7—9].

В лабораториях для определения влагосодержания в жидкой изоляции применяются несколько методик, базирующихся на кулонометрии, электролизе, газовой хроматографии (ГХ), спектроскопии (рис. 1) [10—14]. Некоторые методики не стандартизованы, поскольку находятся в стадии исследований. В первую очередь это касается спектральных методов анализа. Многими специалистами все чаще поднимается вопрос о возможности применения ИК- и люминесцентной спектроскопии, спектроскопии ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для определения разных форм воды (растворенная, эмульсионная, связанная), существующих в минеральных изоляционных маслах [11—14].

На мировом уровне признан метод автоматического кулонометрического титрования с применением реактивов Карла Фишера. Поскольку реактив Фишера способен разрушать связанную воду, его считают методом анализа общего влагосодержания, позволяющим определять все формы воды, но при условии отсутствия частиц углерода и других мешающих соединений в окисленном масле [15]. В российских лабораториях до недавнего времени широко применялись химические методы, в число которых входит гидрид-кальциевый. Однако гидрид-кальциевый метод весьма трудоемок (испытание одной пробы масла занимает около 4 ч) и осуществляется на очень хрупком приборе, что не позволяет получать стабильные метро-

логические параметры, такие как сжимимость, воспроизводимость. Кроме того, нижняя граница определяемой концентрации воды составляет 10 ppm, что указывает на невозможность измерения влагосодержания масла при концентрации воды в нем ниже 10 ppm. По тем же причинам не нашел широкого применения и газохроматографический метод анализа воды в масле.

Методы определения воды в изоляционных жидкостях	Стандарт	Принцип метода	Объект анализа	Форма воды в объекте
	Качественные методы			
	[ГОСТ 1547]	Визуализация	Минеральные масла	Растворенная, эмульсионная
	Химические методы			
	[ГОСТ 7822-75]	Измерение объема газа, выделившегося при взаимодействии веществ	Минеральные масла	Растворенная
	Электрохимические методы			
	[ГОСТ Р МЭК 60814-2013; ASTM D1533]	Кулонометрическое титрование	Минеральные масла Силиконовые жидкости Натуральные эфиры Синтетические эфиры	Общая (связанная, растворенная, эмульсионная)
	Нет стандарта	Кулонометрия с электролизом воды на чувствительном элементе	Минеральные масла	Растворенная
	Хроматографические методы			
	[РД 34.43.107-95; Методика НПО «Электрум»]	ГХ с прямым вводом пробы масла в испаритель	Минеральные масла	Общая (связанная, растворенная, эмульсионная)
		ГХ без вакуумирования	Минеральные масла	Растворенная
	Спектральные методы			
	Нет стандартов	ИК-спектроскопия Люминесцентная спектроскопия ЯМР-спектроскопия ЭПР-спектроскопия	Минеральные масла Силиконовые жидкости Натуральные эфиры Синтетические эфиры	Растворенная, связанная, эмульсионная

Рис. 1

В настоящее время в российских электросетевых лабораториях время для рутинных анализов проб масла наряду с методом Карла Фишера используется электрохимический метод с электролизом воды на чувствительном элементе. Данный метод базируется на парофазном способе извлечения молекул воды из анализируемого образца в десорбционной колонке, переносе парогазовой фазы сухим газом на чувствительный элемент, где происходит электролиз воды. Мерой влажности масла является сила тока (количество электричества), необходимая для электрического разложения всей влаги, поглощенной в единицу времени, при строго стабилизированном расходе газа-носителя с извлеченной влагой.

В отличие от метода Карла Фишера, электрохимический метод с электролизом воды на чувствительном элементе не требует использования реагентов и дорогостоящих расходных материалов. Кроме того, данный метод обладает высокой чувствительностью и позволяет измерять микроконцентрацию влаги в образце начиная с миллионных долей. Точность измерения влажности определяется точностью измерения силы тока и расхода газа. Этот метод может считаться абсолютным, не требующим эмпирической градуировки приборов.

Однако данный метод имеет существенный недостаток, связанный с полнотой извлечения влаги из пробы масла сухим газом-носителем (осушенный воздух) и переносом влаги на пленку сорбента, который нанесен на платиновую проволоку в чувствительном элементе. Дело в том, что полное извлечение влаги из масла при барботировании теоретически возможно только при бесконечном времени измерения. Использование барботирования в реальном

приборе требует расчета количества влаги, оставшегося в масле после барботирования, в течение времени измерения. Точно выполнить эти расчеты для всех видов масел (новых и находящихся в эксплуатации длительное время) фактически невозможно, поскольку количество влаги, оставшейся в масле после измерения, будет зависеть от химического состава и физических свойств масла. По мнению авторов настоящей статьи, одним из вариантов повышения степени извлечения влаги из толщи масла является нагрев масла во время анализа, который можно осуществить путем монтирования термостата на десорбционную колонку с возможностью регулирования температуры нагрева.

В этой связи цель настоящей статьи — модификация существующей установки путем монтирования термостата на десорбционную колонку с возможностью подъема температуры и исследование степени полноты извлечения воды из матрицы масла.

Эксперимент. Объект анализа. В процессе работы было испытано более 100 образцов масла из баков силовых трансформаторов разного класса напряжения (от 110 до 500 кВ). В табл. 1 приведено подробное описание анализируемых проб жидкостей. Так как ситуация, связанная с расхождением результатов определения воды в масле двумя методами, во многих образцах повторяется, в таблице описаны некоторые из образцов. К тому же такое представление материала исследования снижает нагрузку на специалистов при восприятии большого массива данных.

Таблица 1

№ п/п	Наименование оборудования	Тип защиты	Класс напряжения, кВ	Тип масла	Срок эксплуатации, лет
1	Емкость для хранения чистого неиспользованного масла	Герметичная	—	Парафиновое	0
2		Герметичная	—	Парафиновое	0
3		Герметичная	—	Парафиновое	0
4		Герметичная	—	Парафиновое	0
5	Трансформатор 1	Герметичная	110	Парафиновое	31
6	Трансформатор 2	Герметичная	500	Ароматическое	29
7	Трансформатор 3	Свободное дыхание	220	Ароматическое	28
8	Трансформатор 4	Герметичная	110	Нафтовое	6
9	Трансформатор 5	Герметичная	110	Нафтовое	31
10	Трансформатор 6	Свободное дыхание	220	Парафиновое	28
11	Трансформатор 7	Свободное дыхание	220	Нафтовое	28
12	Трансформатор 8	Герметичная	220	Нафтовое	30
13	Трансформатор 9	Герметичная	110	Парафиновое	6
14	Трансформатор 10	Герметичная	110	Парафиновое	6
15	Трансформатор 11	Герметичная	110	Нафтовое	27
16	Трансформатор 12	Герметичная	110	Парафиновое	26
17	Трансформатор 13	Герметичная	110	Ароматическое	28
18	Трансформатор 14	Герметичная	110	Ароматическое	29
19	Трансформатор 15	Свободное дыхание	220	Ароматическое	33
20	Трансформатор 16	Свободное дыхание	220	Парафиновое	31

Метод определения воды. Влагосодержание во всех пробах масла и эфиров определялось методом автоматического титрования с реактивом Карла Фишера [16], а также электрохимическим методом с электролизом воды на чувствительном элементе.

Кулонометрический чувствительный элемент (рис. 2) представляет собой стеклянную трубку 1, внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем влагопоглощающей пятиокиси

фосфора 2. В канале стеклянной трубки по спирали вплавлены платиновые (родиевые) проволочки 3, которые являются электродами. Питание электродов осуществляется постоянным током и на них происходит разложение воды, поглощенной пятиокисью фосфора.

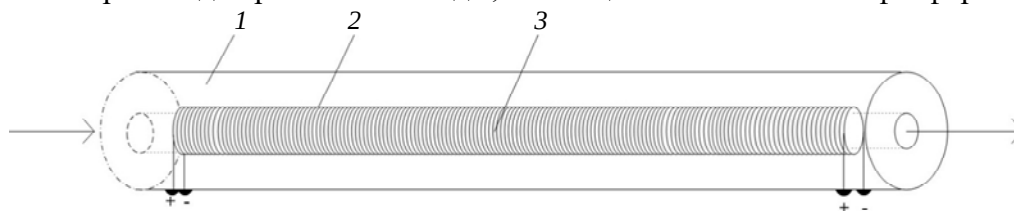
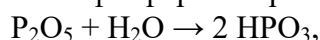
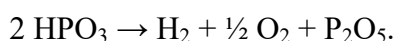


Рис. 2

При работе чувствительного элемента в нем непрерывно протекают два параллельных процесса: поглощение влаги пятиокисью фосфора с образованием фосфорного ангидрида:



и электролитическое разложение влаги с восстановлением пятиокиси фосфора из образовавшегося фосфорного ангидрида:



Таким образом, прямое измерение содержания влаги в контролируемом газе-носителе с извлеченной из пробы трансформаторного масла влагой заменяется измерением силы тока, необходимого для электролиза поглощенной влаги, и расхода газа, протекающего через датчик.

На рис. 3 приведена функциональная схема измерительного устройства с обогреваемой десорбционной колонкой, где 1 — осушитель воздуха; 2 — десорбционная колонка с термостатом; 3 — кулонометрический чувствительный элемент; 4 — источник питания; 5 — делитель напряжения; 6 — микроконтроллер; 7 — индикаторное устройство.

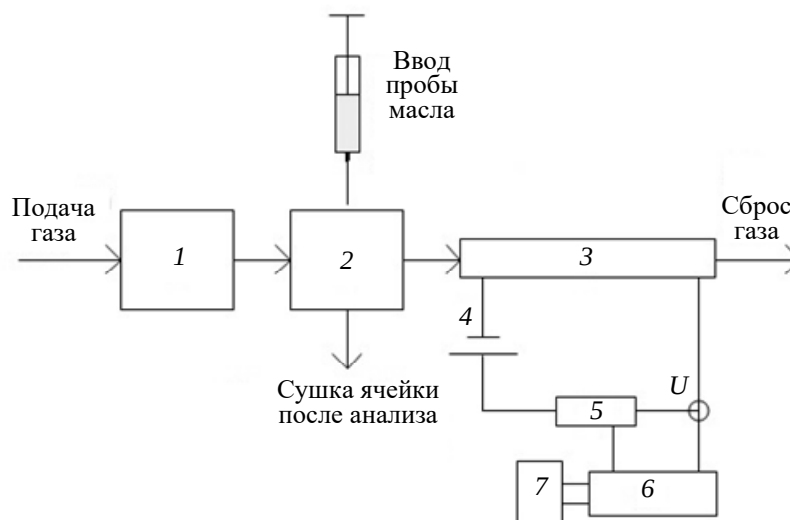


Рис. 3

Проба анализируемого изоляционного масла при помощи шприца-дозатора (объемом 2 мл) вводится в десорбционную колонку. Газ-носитель через стабилизатор давления газа проходит в кулонометрический осушитель 1 и поступает в десорбционную колонку 2. После барботирования нагретой пробы масла в десорбционной колонке газ-носитель с извлеченной влагой поступает в чувствительный элемент 3, где влага адсорбируется и проходит электролиз воды. Напряжение, пропорциональное току электролиза, снимается с делителя напряжения 5 и подается на один из аналоговых входов микроконтроллера 6. Напряжение U интегрируется микроконтроллером во времени, преобразуется в цифровой код, который поступает на индикаторное устройство 7. Показание цифрового табло соответствует массовой доле влаги анализируемого масла (млн^{-1} , ppm или г/т). По окончании цикла измерения (цикл равен 15 мин) проба масла через электромагнитный клапан сливается в дренаж.

С точки зрения полного извлечения влаги из непростой матрицы масла температура десорбционной колонки имеет большое значение. Десорбционную колонку следует рассматривать как герметичный сосуд с постоянным давлением и температурой. Проба масла, содержащая некоторое количество воды, вводится в колонку, нагретую до высоких температур. При этих условиях переход воды в пар ускоряется как за счет снижения вязкости масла, так и барботирования слоя масла сухим газом-носителем. Кроме того, согласно термодинамическим условиям существования фаз, при высоких температуре и давлении происходит испарение молекул воды не только с поверхности, но и в объеме жидкости. Молекулам воды и тяжелым углеводородам сообщается тепловая энергия, которая переходит в кинетическую энергию молекул, необходимую для преодоления барьера притяжения и покидания жидкости. Кинетическая энергия молекул воды в смеси различных углеводородов оказывается больше, поэтому вода быстрее переходит в парообразное состояние, чем остальные компоненты масла. Образовавшийся водяной пар из десорбционной колонки переносится потоком сухого воздуха на чувствительный элемент, где и происходит электролиз воды.

В целом, суть усовершенствованного электрохимического метода заключается в прямом вводе пробы масла (2 мл) в десорбционную колонку, температура которой 80 °С. При такой температуре вязкость масла значительно снижается (см. рис. 1), что способствует наиболее эффективному извлечению всех форм воды (связанная, растворенная, эмульсионная) из матрицы масла. Вода, извлеченная из пробы масла сухим газом, переходит в газообразное состояние. Водяной пар сухим газом-носителем (воздух) переносится на кулонометрический чувствительный элемент, где происходит электролиз воды.

Для контроля степени старения изоляционного масла на протяжении эксперимента измерялось кислотное число по методике, регламентируемой ГОСТ 5985-79.

Результаты исследований и их обсуждение. В табл. 2 приведены результаты измерения концентрации воды в образцах масла, полученные методом автоматического титрования с реактивом Карла Фишера (КФ-метод) и электрохимическим методом с электролизом воды на чувствительном элементе. При этом для электрохимического метода использовался обычный режим (десорбция воды из матрицы масла происходила при комнатной температуре), а также режим нагрева образца масла до 60 и 80 °С. Прослеживается четкая тенденция — чем выше температура в десорбционной колонке, тем выше степень извлечения влаги из матрицы масла.

Таблица 2

N — номер пробы изоляционной жидкости	Содержание воды в изоляционном масле, ppm или г/т			
	КФ-метод [16]	Электрохимический метод с электролизом воды на чувствительном элементе		
	при 20 °С	при 20 °С (обычный метод)	при 60 °С (модифицированный с термостатируемой десорбционной колонкой)	при 80 °С (модифицированный с термостатируемой десорбционной колонкой)
1	41,5±2,9	37,5±0,9	39,8±1,7	41,0±1,7
2	6,2±0,9	3,9±0,7	5,0±0,7	6,1±0,6
3	11,7±1,2	9,6±0,7	10,2±1,1	11,3±0,7
4	7,2±1,0	5,3±0,3	6,1±0,5	7,3±0,8
5	10,2±1,0	7,6±0,6	8,4±0,8	9,7±0,5
6	2,4±0,5	2,0±0,4	2,1±0,5	2,8±0,4
7	6,4±0,9	4,8±0,5	5,0±0,6	5,6±0,5
8	5,7±0,7	3,2±0,5	4,3±0,5	5,2±0,4
9	8,2±0,9	5,8±0,6	6,5±0,6	8,0±0,6
10	7,9±0,7	5,1±0,4	6,4±0,6	7,5±0,7
11	9,8±0,9	6,2±0,3	7,3±0,9	9,1±0,6
12	18,4±2,8	10,4±0,4	12,3±0,5	16,5±0,9
13	10,7±1,4	5,6±0,5	6,5±0,6	8,6±0,6
14	7,7±0,8	3,2±0,3	4,2±0,4	6,0±0,8
15	12,9±1,3	6,0±0,5	8,3±0,9	10,9±1,1

Продолжение табл. 2

N — номер пробы изоляционной жидкости	Содержание воды в изоляционном масле, ppm или г/т			
	КФ-метод [16]	Электрохимический метод с электролизом воды на чувствительном элементе		
		при 20 °C	при 60 °C (модифицированный с термостатируемой десорбционной колонкой)	при 80 °C (модифицированный с термостатируемой десорбционной колонкой)
16	13,3±1,1	7,1±0,5	8,2±0,6	12,1±0,9
17	11,8±1,2	6,6±0,4	7,4±0,5	9,2±0,8
18	16,5±2,0	7,4±0,4	10,2±0,5	13,0±0,8
19	17,3±1,7	8,7±0,6	11,3±0,9	15,4±1,3
20	20,1±2,2	9,8±0,5	13,4±1,1	17,6±1,7

Определение воды титрованием с реактивами Карла Фишера [16] во всем мире считается арбитражным методом. Согласно методике предел воспроизводимости определяется как

$$R = 1,5 \cdot \sqrt{\bar{X}}, \quad (1)$$

где $\bar{X}$ — среднеарифметическое значение результатов двух испытаний, полученных в условиях воспроизводимости (двумя разными методами).

Результаты, полученные в условиях внутрилабораторной прецизионности, будем считать удовлетворительными при выполнении условия

$$|R_k| \leq R_L, \quad (2)$$

$$R_k = |X_{\text{КФ}} - X_{\text{э.х}}|, \quad R_L = 0,84 \cdot R,$$

где $X_{\text{КФ}}$ — результаты, полученные по методу Карла Фишера; $X_{\text{э.х}}$ — результаты, полученные электрохимическим методом на влагомере с модифицированной термостатируемой колонкой; R_k — результат контрольной процедуры; R_L — предел внутрилабораторной прецизионности.

В табл. 3 показана воспроизводимость результатов модифицированного электрохимического анализа определения воды относительно результатов по методу Карла Фишера

Таблица 3

N	R_k	R_L	R_k	R_L	R_k	R_L
	при 20 °C		при 60 °C		при 80 °C	
1	4,0	7,9	1,7	8,0	0,5	8,1
2	2,3	2,8	1,2	3,0	0,2	3,1
3	2,1	4,1	1,5	4,2	0,4	4,3
4	1,8	3,1	1,1	3,2	0,1	3,4
5	2,6	3,7	1,7	3,8	0,5	4,0
6	0,4	1,9	0,4	1,9	0,4	2,0
7	1,6	3,0	1,4	3,0	0,8	3,1
8	2,5	2,6	1,4	2,8	0,5	2,9
9	2,4	3,3	1,9	3,4	0,2	3,6
10	2,7	3,2	1,4	3,4	0,4	3,5
11	3,7	3,6	2,6	3,7	0,7	3,9
12	8,0	4,8	6,2	4,9	2,0	5,3
13	5,1	3,6	4,2	3,7	2,1	3,9
14	4,5	2,9	3,5	3,1	1,7	3,3
15	6,9	3,9	4,6	4,1	2,0	4,3
16	6,2	4,0	5,2	4,1	1,3	4,5
17	5,2	3,8	4,3	3,9	2,6	4,1
18	9,1	4,4	6,3	4,6	3,5	4,8
19	8,7	4,5	6,1	4,8	1,9	5,1
20	10,2	4,9	6,6	5,2	2,5	5,5

Примечание. Жирным шрифтом выделены неудовлетворительные результаты при проведении оценки по условию $|R_k| \leq R_L$.

Как видно из табл. 3, значения влагосодержания в пробах масла, полученные методом титрования с реактивом Карла Фишера и электрохимическим методом при комнатной температуре, существенно различаются. Особенно сильное различие наблюдается для проб 11—20, где результат контрольной процедуры больше, чем предел внутрилабораторной прецизионности. Сопоставляя результаты, приведенные в табл. 3, с рис. 4, можно заметить, что расхождение результатов коррелирует со значением кислотного числа трансформаторного масла (I_A). Чем старше жидкий диэлектрик, тем больше расхождение результатов анализа воды в нем, полученных разными методами. Если за эталон измерения воды в масле принять метод Карла Фишера, то концентрация воды в пробах, измеренная электрохимическим методом без нагрева пробы в десорбционной колонке, существенно занижена.

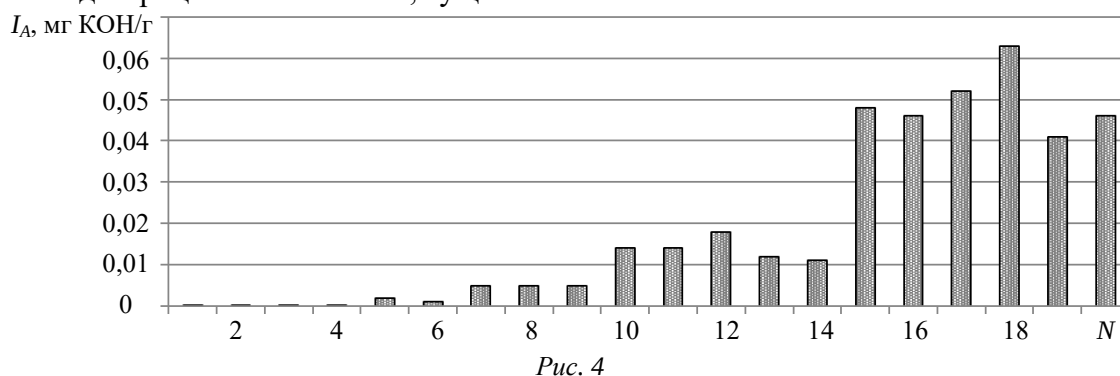


Рис. 4

Однако ситуация улучшается, когда десорбционная колонка оборудуется термостатом, который позволяет нагревать пробу при барботировании масла сухим воздухом. На момент испытаний из-за ограниченных технических возможностей нагрев пробы диэлектрической жидкости в десорбционной колонке осуществлялся только до 60 °С и до 80 °С. Как видно из результатов (см. табл. 2), нагрев пробы до 60 и 80 °С приводит к увеличению степени извлечения воды из матрицы масла, что отражается и на близости значений концентрации воды в диэлектрике, полученных двумя разными методами (см. табл. 3). Наилучшее значение относительного среднего отклонения результатов (полученных КФ-методом и электрохимическим с чувствительным элементом) достигается, когда десорбционная колонка в электрохимическом методе нагревается до 80 °С. В этом случае во всех образцах выполняется условие $|R_k| \leq R_L$, что указывает на хорошую воспроизводимость результатов, полученных двумя методами.

Вне зависимости от типа масла (парафиновое, нафтенное, ароматическое) и его начального химического состава в процессе эксплуатации электрооборудования происходит старение жидкого диэлектрика. В результате многочисленных окислительных реакций в масле образуются, в том числе, полярные вещества. В описываемом эксперименте наличие таких соединений подтверждается ростом значения кислотного числа (см. рис. 4). Известно, что такие соединения способствуют растворению воды в минеральном масле [17, 18]. Дело в том, что в результате поляризующего воздействия между поляризованными молекулами Н-О-Н и отдельными поляризованными функциональными группами (гидроксильными, карбонильными, карбоксильными, непредельными и др.) органических соединений формируется физически связанная вода.

В отличие от диспергированной воды в идеализированном чистом масле, физически связанная вода в загрязненном масле будет покрыта слоем поверхностно-активного вещества, что обеспечит существование стойких коллоидов. Для того чтобы измерить общее влагосодержание воды, необходимо разрушить связи в таких стойких коллоидах и высвободить молекулы воды. Учитывая, что в титровании по Карлу Фишеру применяются реактивы, взаимодействующие с многими компонентами пробы масла, можно с использованием КФ-метода измерить общее влагосодержание [15]. Что касается электрохимического метода с электроли-

зом воды на чувствительном элементе, то здесь возникает проблема с извлечением паров воды из углеводородной матрицы масла. В процессе барботирования пробы масла сухим воздухом в десорбционной колонке (см. 2, рис. 3) при комнатной температуре вязкость масла выше, чем при нагревании пробы масла до 60 и 80 °С. Чем выше вязкость масла, тем больше сопротивление при перемещении одной части среды относительно другой и тем больше воды удерживается в пробе масла. В табл. 2 хорошо прослеживается увеличение количества извлеченной влаги из масла с ростом температуры десорбционной колонки независимо от марки и возраста масла. Повышение температуры приводит к снижению вязкости масла, что способствует увеличению концентрации влаги в парогазовой смеси и снижению количества воды в масляной фазе.

Заключение. Представлен способ усовершенствования электрохимического метода определения воды в масле путем монтирования термостата на десорбционную колонку. Такой метод интересен тем, что является безреактивным.

Сопоставляя результаты электрохимического анализа без нагревания пробы масла в десорбционной колонке (обычный метод) с данными, полученными по методу кулонометрического титрования с реактивом Карла Фишера, можно отметить, что результаты различаются по воспроизводимости, что хорошо иллюстрирует табл. 3. Особенно результаты становятся не воспроизводимыми для окисленных проб масла, где относительное среднее отклонение составляет более 30 %. Иными словами, полученные результаты свидетельствуют о том, что разные методы контроля влагосодержания масла дают несравнимые результаты.

Модифицирование десорбционной колонки с помощью термостата позволяет производить нагрев пробы масла, что в целом сказывается на улучшении метрологических характеристик электрохимического метода. При нагревании пробы масла в десорбционной колонке влагомера до 80 °С результаты являются хорошо воспроизводимыми. Следовательно, существует необходимость серийного выпуска влагомера трансформаторного масла с термостатируемой десорбционной колонкой с возможностью регулирования температуры в диапазоне от 20 до 80 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arakelian V. G., Fofana I. Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment. Part I: States, Solubility and Equilibrium in Insulating Materials // IEEE Electr. Insul. Magaz. 2007. Vol. 6 (4). P. 15—27.
2. Arakelian V. G., Fofana I. Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment. Part II: Water Content as Physicochemical Tools for Insulation Condition Diagnostic // IEEE Electr. Insul. Magaz. 2007. Vol. 23 (5). P. 15—24.
3. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Ридель А. В. Анализ образования капель воды в трансформаторном масле и влияние на пробивную прочность жидкого диэлектрика // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 18—24.
4. Du Y., Mamishev A. V., Lesieutre B. C., Zahn M., Kang S. H. Moisture solubility for differently conditioned transformer oils // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2001. Vol. 8 (5). P. 805—811.
5. Lupandina I., Gawlik W., Schrammel M., Ilgevicus A., Kurten M., Viereck K. Evaluation of dynamic loading capability for optimal loading strategies of power transformers // Proc. of the 48th CIGRE Session, Paris, 2020.
6. Metwally I. A. Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers // IEEE Potentials Magazine. 2011. Vol. 30 (3). P. 36—43.
7. IEEE Standard IEC 60422. Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment—Supervision and Maintenance Guidance; International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2013.
8. IEEE Standard IEC 60296. Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear; International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2012.
9. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. М.: ПАО „Россети“, 262 с.

10. Коробейников С. М., Лютикова М. Н. Методы контроля влагосодержания жидких диэлектриков. Состояние и проблемы // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 9—10. С. 32—49.
11. Туранов А. Н. Новые методы диагностики и изучения механизмов деградации трансформаторных масел: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Казань, 2021.
12. Kozlov V., Turanov A. Transformer oil and modern physics // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2012. Vol. 19 (5). P. 1485—1497.
13. Volkov M., Turanova O., Turanov A. Determination of moisture content of insulating oil by NMR method with selective pulses // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25 (5). P. 1989—1991.
14. Kozlov V. K., Turanova O. A., Kurakina O. E., Turanov A. N. Determination of moisture content of insulating oils by CoCl₂ // Problemele Energeticii Regionale. 2021. Vol. 1 (49). P. 21—28.
15. Margolis S. A. Sources of Systematic Bias Reflected in an ASTM Collaborative Study on Water in Oil Measured by the Karl Fischer Method // Electrical Insulating Materials: Intern. Issues; Ed. M. M. Hirschler. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2000. P. 59—69.
16. IEEE Standard IEC 60814. Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard - Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration; International Electrotechnical Commission (IEC): Geneva, Switzerland, 2014.
17. Kalariya K., Kannad H., Vyas D., Gandhi P. A review on ageing of power transformer and insulation life assessment // Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering. 2014. Vol. 2. P. 117—122.
18. Ricardo D., Medina A. A., Romero E. E., Giuseppe R. M. Assessing degradation of power transformer solid insulation considering thermal stress and moisture variation // Electric Power Systems Research. 2017. Vol. 151. P. 1—11.

Сведения об авторах

- Марина Николаевна Лютикова** — канд. хим. наук, доцент; Новосибирский государственный технический университет, кафедра безопасности труда; E-mail: m.lyutikova@mail.ru
- Александр Викторович Ридель** — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, кафедра безопасности труда; ст. научный сотрудник; E-mail: ridel@corp.nstu.ru

Поступила в редакцию 29.09.22; одобрена после рецензирования 31.10.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Arakelian V.G., Fofana I. *IEEE Electr. Insul. Magaz.*, 2007, no. 4(6), pp. 15—27.
2. Arakelian V.G., Fofana I. *IEEE Electr. Insul. Magaz.*, 2007, no. 5(23), pp. 15—24.
3. Lyutikova M.N., Korobeynikov S.M., Ridel' A.V. *Promyshlennaya energetika*, 2020, no. 5, pp. 18—24. (in Russ.)
4. Du Y., Mamishev A.V., Lesieutre B.C., Zahn M., Kang S.H. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2001, no. 5(8), pp. 805—811.
5. Lupandina I., Gawlik W., Schrammel M., Ilgevicus A., Kurten M., Viereck K. *Proc. of 48th CIGRE Session*, Paris, 2020, D1-108.
6. Metwally I.A. *IEEE Potentials Magazine*, 2011, no. 3(30), pp. 36—43.
7. IEEE Standard IEC 60422. *Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment – Supervision and Maintenance Guidance*, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2013.
8. IEEE Standard IEC 60296. *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2012.
9. STO 34.01-23.1-001-2017. *Ob'yem i normy ispytaniya elektrooborudovaniya* (STO 34.01-23.1-001-2017. Scope and standards for testing electrical equipment), Moscow, 262 p. (in Russ.)
10. Korobeynikov S.M., Lyutikova M.N. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2017, no. 9-10, pp. 32—49. (in Russ.)
11. Turanov A.N. *Novyye metody diagnostiki i izucheniya mekhanizmov degradatsii transformatornykh masel* (New Methods for Diagnosing and Studying the Mechanisms of Degradation of Transformer Oils), Doctor's thesis, Kazan, 2021, 220 p. (in Russ.)
12. Kozlov V., Turanov A. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, no. 5(19), pp. 1485—1497.
13. Volkov M., Turanova O., Turanov A. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, no. 5(25), pp. 1989—1991.
14. Kozlov V.K., Turanova O.A., Kurakina O.E., Turanov A.N. *Problemele Energeticii Regionale*, 2021, no. 1(49), pp. 21—28.
15. Margolis S.A. *Electrical Insulating Materials: International Issues*, West Conshohocken, American Society for Testing and Materials, PA, 2000, pp. 59—69.

16. IEEE Standard IEC 60814. *Insulating liquids - Oil-impregnated paper and pressboard - Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration*, International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 2014.
17. Kalariya K., Kannad H., Vyas D., Gandhi P. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, 2014, vol. 2, pp. 117–122.
18. Ricardo D., Medina A.A., Romero E.E., Giuseppe R.M. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 151, pp. 1–11.

Data on authors

- Marina N. Lyutikova** — PhD, Associate Professor; Novosibirsk State Technical University, Department of Labor Safety; E-mail: m.lyutikova@mail.ru
- Alexander V. Ridel** — PhD, Senior Researcher; Novosibirsk State Technical University, Department of Labor Safety; Senior Researcher; E-mail: ridel@corp.nstu.ru

Received 29.09.22; approved after reviewing 31.10.22; accepted for publication 25.01.23.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
АВИАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ МОЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ
В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

Е. Е. МАЙОРОВ^{1*}, Г. А. КОСТИН², Т. А. ЧЕРНЯК²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
* majorov_ee@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы изучения оптических свойств авиационных технических моющих жидкостей в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Корректная идентификация моющих жидкостей для промывки газоздушного тракта газотурбинного двигателя имеет важнейшее значение для обеспечения безопасности полетов. Представлен метод ультрафиолетовой спектроскопии и приведена оптическая схема спектрофлуориметрического анализатора. Измерены спектральные зависимости коэффициента поглощения исследуемых сред, смешанных с дистиллированной водой и определены максимальные значения поглощающей способности исследуемых проб в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: коэффициент поглощения, спектрофлуориметрический анализатор, кювета, проба, длина волны, технические моющие жидкости

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических свойств авиационных технических моющих жидкостей в ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 234—240. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-234-240.

**INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES
OF AVIATION TECHNICAL WASHING LIQUIDS IN THE ULTRAVIOLET WAVELENGTH RANGE**

E. E. Maierov^{1*}, G. A. Kostin², T. A. Chernyak²

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia,
* majorov_ee@mail.ru

² St. Petersburg State University of Civil Aviation,
St. Petersburg, Russia

Abstract. The issues of studying the optical properties of aviation technical washing liquids in the ultraviolet wavelength range are considered. Correct identification of cleaning fluids for washing the gas-air path of a gas turbine engine is essential for ensuring flight safety. The method of ultraviolet spectroscopy is presented and the optical scheme of the spectrofluorimetric analyzer is given. The spectral dependences of the absorption coefficient of the studied media mixed with distilled water are measured, and the maximum values of the absorbance of the studied samples in the ultraviolet wavelength range are determined.

Keywords: absorption coefficient, spectrofluorimetric analyzer, cuvette, sample, wavelength, technical detergents

For citation: Maierov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. Investigation of optical properties of aviation technical washing liquids in the ultraviolet wavelength range. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 234—240 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-234-240.

Введение. Максимальная безопасность полетов — важнейшая задача гражданской авиации. Техническими службами аэропорта огромное внимание уделяется работоспособности газотурбинного двигателя в процессе эксплуатации воздушного судна, поэтому вопросы

промывки газоздушного тракта для удаления нагарообразных, масляных, сажистых и пылевых загрязнений имеют особое значение [1, 2]. Для решения этих задач в авиации применяются технические моющие средства отечественного производства М-1 и М-2, а также зарубежные аналоги Turbotect и Zok. В процессе эксплуатации летательного аппарата на лопатках турбины образуется налет из частиц масел, морской соли, пыли и почвы, что приводит к ухудшению термодинамических характеристик газотурбинного двигателя [3, 4]. В частности, увеличивается эмиссия вредных веществ, расход топлива, рабочая температура, уменьшается коэффициент полезного действия и выходная мощность двигателя. Это, в свою очередь, может привести к возникновению коррозионных областей, разрушению защитных поверхностей деталей и агрегатов, а в результате к выходу из строя газотурбинного двигателя. Поэтому техническими службами аэропорта должен производиться регулярный профилактический контроль за чистотой поверхностей узлов и агрегатов газоздушного тракта газотурбинного двигателя, а технические моющие жидкости должны удовлетворять требованиям к эксплуатации [5, 6].

В последнее время на рынке химической продукции участились случаи появления поддельных жидкостей, химические параметры которых не соответствуют заявленным гос. стандартами. Достоверный анализ состава этих веществ возможен с помощью оптико-электронных приборов и комплексов.

На сегодняшний день используются различные методы и средства измерения физико-химических и оптических параметров веществ в жидком агрегатном состоянии [7, 8]. Одни из них — это методы спектрального анализа, применяемые для качественного и количественного анализа с использованием приборов и систем, работа которых основана на выявлении оптических спектров поглощения, пропускания и отражения исследуемого вещества [9, 10].

Изучение авиационных технических моющих жидкостей спектральными методами, в частности абсорбционной спектроскопией, позволяет определить оптические параметры исследуемых сред [11, 12]. В научной литературе приводятся физико-химические и оптические параметры этих веществ, причем оптические параметры найдены преимущественно в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн [13, 14]. Однако данные по коэффициенту поглощения (K) в ультрафиолетовом диапазоне отсутствуют [15, 16].

В этой связи практическую и научную значимость представляет абсорбционная спектроскопия в ультрафиолетовой области спектра для исследования указанных сред, где поглощение обусловлено оптическими переходами между электронными состояниями в щелочных компонентах, поверхностно-активных веществах и комплексообразователях [17, 18]. На основе полученных экспериментальных данных могут быть уточнены и оптимизированы алгоритмы контроля и внесены в лабораторный измерительный комплекс на производстве технических моющих жидкостей.

В настоящей статье представлены результаты исследования оптических свойств авиационных технических моющих жидкостей в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Постановка задачи. Используя спектрофлуориметрический анализатор „Флюорат-02-Панорама“, измерить максимальные значения коэффициента поглощения технических моющих жидкостей в диапазоне длин волн от 210 до 400 нм.

Метод и объект исследования. Объекты исследования — технические моющие жидкости: отечественного производства М-1 и зарубежных марок Turbotect T-950, Mcgean-Rohco Zok-27.

М-1 — водный раствор щелочных компонентов, содержащий поверхностно-активные вещества и комплексообразователи. Это бесцветная или с незначительным желтоватым оттенком однородная прозрачная жидкость. При работе с этим моющим веществом необходимо использовать средства индивидуальной защиты, соответствующие утвержденным стандартам (хлопчатобумажные халаты, костюмы, комбинезоны, кожаную обувь, фильтрующие

респираторы, в аварийных ситуациях — противогазы, защитные очки, полиэтиленовые или резиновые перчатки), избегать вдыхания моющего средства и попадания его внутрь, на кожу и в глаза.

Turbotect T-950 — прозрачная или с голубоватым оттенком и мягким запахом жидкость, содержащая этоксилированные жирные спирты и этоксилированные разветвленные оксоспирты. При использовании жидкости следует соблюдать рекомендации производителя — для работы необходимы средства индивидуальной защиты органов дыхания, кожи, глаз, лица.

Mcgean-Rohco Zok-27 — прозрачная жидкость, содержащая поверхностно-активные вещества и эмульгаторы в деионизированном водном растворе. При работе с жидкостью также необходимо использовать средства индивидуальной защиты, избегать вдыхания моющего средства и попадания его внутрь, на кожу и в глаза.

Измерения спектров оптического поглощения проводились на спектрофлуориметрическом анализаторе „Флюорат-02-Панорама“ (выпускается ООО „Люмэкс“, Санкт-Петербург, Россия), позволяющем проводить анализ в ультрафиолетовой области спектра. Прибор, внешний вид которого представлен на рис. 1, предназначен для проведения научных исследований спектров возбуждения и регистрации флуоресценции различных веществ, измерения их фотометрических характеристик, а также для аналитического и санитарного контроля различных природных объектов. Спектроанализатор состоит из оптической схемы, в которой есть приемник и источник излучения, электронного измерительного блока, источника питания (ФЭУ), системы сканирования монохроматоров, пульта контроля с цифровым индикатором и приемников излучения.



Рис. 1

Оптическая схема спектроанализатора (рис. 2) содержит четыре основных канала: I — возбуждение люминисценции (осветительный), II — опорный, III — фотометрический (канал пропускания), IV — канал регистрации люминисценции (флюориметрический). В состав схемы входят: 1 — источник излучения, 2 — элемент устранения второго порядка дифракции, 3 — монохроматор канала возбуждения, 4 и 7 — светофильтры, 5 и 10 — светоделители, 6 — кювета, 8 — монохроматор канала регистрации, 9 — фотоприемное устройство, 11 — фотоприемник фотометрического канала, 12 — фотоприемник опорного канала.

Спектроанализатор работал в фотометрическом режиме измерений. Световой пучок от источника излучения (ксеноновая лампа) проходил через монохроматор 3 и попадал на све-

тоделитель 5, далее через кварцевую кювету 6 с исследуемым веществом отражался от светоделителя 10 и направлялся на фотоприемник 11 в фотометрический канал.

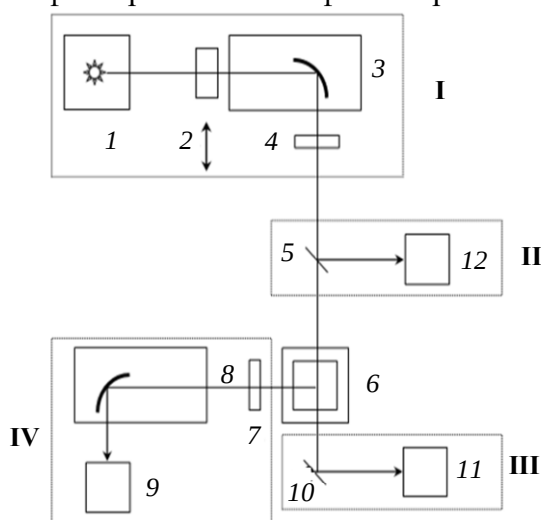


Рис. 2

**Технические характеристики спектрофлуориметрического анализатора
„Флюорат-02-Панорама“**

Спектральный диапазон, нм.....	210...840
Спектральное разрешение монохроматоров, нм.....	8
Погрешность установки монохроматоров, нм.....	3
Отношение сигнал/шум.....	100:1
Объем анализируемой пробы в стандартной кювете К-10, мл.....	3
Питание:	
напряжение, В	110—220
частота, Гц	50—60
Потребляемая мощность, Вт	40
Размеры прибора, мм.....	400×355×150
Масса, кг	15

Экспериментальные результаты. Образцы проб были приготовлены в лабораторных условиях. Для спектрофотометрических измерений проб технических моющих жидкостей использовалась градуированная пипетка для химического анализа с погрешностью измерений $\pm 0,2$ мл. С помощью пипетки осуществлялся забор необходимого для анализа авиационного технического средства и производилось взвешивание на микровесах LT-JS 20, погрешность которых составляла $\pm 0,001$ г. Затем авиационные жидкости смешивались с дистиллированной водой и во всех образцах проб содержание их составляло 0,02 % (или 0,2 мл на 1 л воды). Далее пробы помещались в кварцевые кюветы (К10), и на спектроанализаторе измерялся их спектр.

В ходе эксперимента изучались ультрафиолетовые спектры поглощения дистиллированной воды с жидкостями М-1, Turbotect Т-950 и Mcgean-Rohco Zok-27. Поглощение дистиллированной воды в этом диапазоне длин волн отсутствует и принималось за ноль. На рис. 3 показаны спектральные зависимости коэффициента поглощения (K) в различных авиационных технических жидкостях: 1 — М-1, 2 — Turbotect Т-950, 3 — Mcgean-Rohco Zok-27. Как видно на графике, максимальное значение K для жидкости М-1, смешанной с водой, находится в диапазоне длин волн $\lambda=390...400$ нм; для жидкости Turbotect Т-950 максимум кривой наблюдается при $\lambda=370...380$ нм, а для Mcgean-Rohco Zok-27 — при $\lambda=375...385$ нм.

Для каждого из исследуемых веществ, размешанных в дистиллированной воде, основными поглотителями в ультрафиолетовом диапазоне длин волн стали поверхностно-активные вещества. При концентрации авиационной жидкости в воде (0,02 %) посредством абсорбционного анализа определен состав поверхностно-активных веществ. Данный спектральный

анализ позволяет идентифицировать техническое моющее средство для конкретного воздушно-го судна.

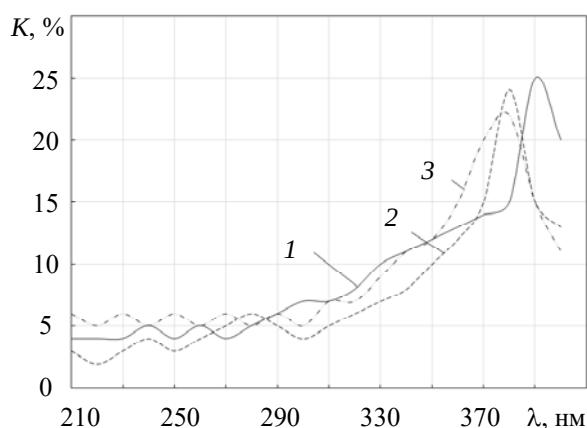


Рис. 3

Заключение. Корректная идентификация авиационных технических моющих жидкостей для промывки газозвдушного тракта газотурбинного двигателя является важнейшей задачей для технических подразделений, обслуживающих воздушные суда. От того насколько верно выбрано средство, зависит качество промывки и соответственно работа двигателя, что непосредственно влияет на безопасность полетов.

Рассмотренный в статье метод ультрафиолетовой спектроскопии, как метод неразрушающего контроля, экологичен и экономичен. Получены спектральные кривые исследуемых проб и определены максимальные значения коэффициента поглощения. Полученные данные могут дополнить физико-химические свойства исследованных веществ. Приведенные экспериментальные результаты представляют интерес как для химических производств, создающих данные моющие средства, так и для оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2(35). С. 76—87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
2. Вахрушев Е. С. Промывка ГВД двигателя — одно из важнейших условий сохранения его эффективности // Информ. бюл.: „Пермские газовые турбины. Транспорт газа и энергетика“. 2009. № 15 [Электронный ресурс]: <<http://www.pnz.ru>>, 19.09.2022.
3. Моющие жидкости [Электронный ресурс]: <<http://lemix-samara.ru/liquid.html>>, 05.10.2022.
4. Stalder J. P. Gas Turbine Compressor Washing State of the Art: Field Experiences // *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*. 2001. Vol. 123. P. 363—370.
5. Syverud E., Brekke O., Bakken L. Axial compressor deterioration causer by saltwater ingestion // *Journal of Turbomachinery*. 2007. Vol. 129, N 1. P.119—126.
6. Chemical Cleaning Solution for Gas Turbine Blades: WO 2001/040548 (Pat.); Filed 30.11.2000; Publ. 30.10.2002.
7. 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.
8. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Писарева Е. А. Исследование оптических свойств черных щелоков рефрактометрическими и спектрофотометрическими методами при производстве сульфатной целлюлозы // *Науч. вед. Белгород. гос. ун-та*. 2018. Т. 50, № 1. С. 55—63. DOI: 10.18413/2075-4639-2018-50-1-55-63.
9. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Писарева Е. А. Исследование спектрофотометра ультрафиолетовой области длин волн для анализа спектров пропускания дисперсных сред // *Изв. ТулГУ. Технические науки*. 2018. Вып. 4. С. 357—365.

10. Майоров Е. Е., Туровская М. С., Литвиненко А. Н., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Пономарев С. Е., Курлов В. В., Катунин Б. Д. Исследование разработанного спектрофотометра для ультрафиолетовой области спектра и его технико-экономическое обоснование // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 7. С. 38—43.
11. Майоров Е. Е., Константинова А. А., Шаламай Л. И., Цыганкова Г. А., Машек А. Ч., Пушкина В. П., Хохлова М. В., Коцкович В. Б., Дагаев А. В. Исследования оптических спектров диметилсульфоксида (CH₃)₂SO // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2019. № 7. С. 212—223.
12. Арефьев А. В., Бородинский Ю. М., Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Хохлова М. В., Гулиев Р. Б. Разработка экспериментальной методики для фотометрического анализа нефтепродуктов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 9. С. 1—5. DOI: 10.25791/pribor.09.2020.1202.
13. Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Соколовская М. В. Исследование оптических свойств продуктов косметологии спектрофотометром, работающим в дальнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 128—133. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133.
14. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1983. 352 с.
15. 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.
16. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Спектрофотометрия углеводородного топлива для летательных аппаратов дозвуковой авиации // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 100—105. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105.
17. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Исследование оптических свойств авиационных гидравлических жидкостей методом оптической спектроскопии // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 80—85. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85.
18. Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Цыганкова Г. А., Машек А. Ч., Константинова А. А., Писарева Е. А. Спектральное исследование текстильного оптического отбеливателя и органического красителя // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 1. С. 73—83. DOI: 10.18358/np-31-1-e010.

Сведения об авторах

- | | |
|--------------------------------------|---|
| Евгений Евгеньевич Майоров | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Геннадий Александрович Костин | — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, кафедра прикладной математики и информатики; проректор по науке и цифровизации; E-mail: ga_kostin@spbguga.ru, g_kostin@mail.ru |
| Татьяна Анатольевна Черняк | — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, кафедра высшей математики; зав. кафедрой; E-mail: 79119113039@yandex.ru |

Поступила в редакцию 25.10.22; одобрена после рецензирования 01.11.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. *Aviacionnye Materialy and Tehnologii*, 2015, no. 2(35), pp. 76—87, DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87. (in Russ.)
2. <http://www.pnz.ru>.
3. <http://lemix-samara.ru/liquid.html>. (in Russ.)
4. Stalder J.P. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 2001, vol. 123, pp. 363—370.
5. Syverud E., Brekke O., Bakken L. *Journal of Turbomachinery*, 2007, no. 1(129), pp. 119—126.
6. Patent WO 2001/040548, *Chemical Cleaning Solution for Gas Turbine Blades*, Priority 30.11.00, Published 30.10.02.
7. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khaidarov A.G., Abramyan V.K., Zaitsev Yu.E. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2016, no. 8, pp. 42—46. (in Russ.)
8. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Pisareva E.A. *Scientific Bulletin of Belgorod State University*, 2018, no. 1(50), pp. 55—63, DOI: 10.18413/2075-4639-2018-50-1-55-63. (in Russ.)
9. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Pisareva E.A. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 4, pp. 357—365. (in Russ.)

10. Maiorov E.E., Turovskaya M.S., Litvinenko A.N., Chernyak T.A., Dagaev A.V., Ponomarev S.E., Kurlov V.V., Katunin B.D. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 7, pp. 38–43. (in Russ.)
11. Maiorov E.E., Konstantinova A.A., Shalamay L.I., Tsygankova G.A., Mashek A.Ch., Pushkina V.P., Khokhlova M.V., Kotskovich V.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University*. Technical Sciences, 2019, no. 7, pp. 212–223. (in Russ.)
12. Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Maiorov E.E., Dagaev A.V., Khokhlova M.V., Guliyev R.B. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 9, pp. 1–5, DOI: 10.25791/pribor.09.2020.1202 (in Russ.)
13. Maiorov E.E., Afanas'eva O.V., Sokolovskaya M.V. *News of the Tula State University*. Technical Sciences, 2022, no. 8, pp. 128–133, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133. (in Russ.)
14. Ioffe B.V. *Refraktometricheskiye metody khimii (Refractometric Methods of Chemistry)*, Leningrad, 1983, 352 p. (in Russ.)
15. Kuzmina D.A., Maiorov E.E., Shalamai L.I., Mendoza 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.)
16. Kostin G.A., Chernyak T.A., Maiorov E.E., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University*. Technical Sciences, 2022, no. 8, pp. 100–105, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105. (in Russ.)
17. Kostin G.A., Chernyak T.A., Maiorov E.E., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University*. Technical Sciences, 2022, no. 8, pp. 80–85, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85. (in Russ.)
18. Maiorov E.E., Chernyak T.A., Tsygankova G.A., Mashek A.Ch., Konstantinova A.A., Pisareva E.A. *Nauchnoe Priborostroyeniye (Scientific Instrumentation)*, 2021, no. 1(31), pp. 73–83, DOI: 10.18358/np-31-1-e010. (in Russ.)

Data on authors

Evgeny E. Maiorov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: maiorov_ee@mail.ru
Gennady A. Kostin	—	Dr. Sci, Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation, Department of Applied Mathematics and Informatics; Vice-Rector for Science and Digitalization; E-mail: ga_kostin@spbguga.ru, g_kostin@mail.ru
Tatiana A. Chernyak	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation, Department of Higher Mathematics; Head of the Department; E-mail: 79119113039@yandex.ru

Received 25.10.22; approved after reviewing 01.11.22; accepted for publication 25.01.23.

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

УДК 658.512
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-241-246

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ ЛИТЬЕВЫХ ФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. Г. ЛОПАТОВ, А. В. ЧУКИЧЕВ*, О. С. ТИМОФЕЕВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*avchukichev@itmo.ru

Аннотация. Представлена методика проектирования формообразующих деталей литьевых форм. Приведены результаты анализа параметров литниковой системы в виде таблицы зависимостей от параметров полимерного изделия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке базы знаний.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, полимерные изделия, литье под давлением, параметрическое моделирование, перенастраиваемая литьевая форма

Ссылка для цитирования: Лопатов М. Г., Чукичев А. В., Тимофеева О. С. Методика проектирования формообразующих деталей литьевых форм с использованием информационных технологий // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 241—246. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-241-246.

METHODOLOGY FOR DESIGNING FORMING PARTS OF INJECTION MOLDS USING INFORMATION TECHNOLOGIES

M. G. Lopatov, A. V. Chukichev*, O. S. Timofeeva

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*avchukichev@itmo.ru

Abstract. A method of designing forming parts of injection molds is presented. Results of analysis of the gating system parameters are presented in the form of a table of dependences on parameters of a polymer product. The obtained results can be used in the development of a knowledge base.

Keywords: technological production preparation, polymer product, injection molding, parametrization, reconfigurable injection mold

For citation: Lopatov M. G., Chukichev A.V., Timofeeva O. S. Methodology for designing forming parts of injection molds using information technologies. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 241—246 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-241-246.

Введение. В настоящее время сокращение сроков изготовления и внедрения часто меняющейся номенклатуры изделий — одна из актуальных задач на приборостроительных предприятиях [1]. Производство, основанное на единой модели данных об изделиях, процессах и производственных системах, цифровых методах планирования, моделирования, мониторинга и управления, — это базовая ступень к созданию цифрового производства. Переход к цифровому производству связан с необходимостью повышения уровня автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) и взаимной интеграции систем CAD, CAM, CAE,

САРР, PLM. В жизненном цикле изделий из полимерных материалов ТПП является самым длительным этапом, связанным с проектированием и изготовлением специального формообразующего оснащения — литевых форм. Применение методов унификации и принципов группирования, а также использование систем автоматизированного проектирования позволяют значительно сократить сроки ТПП [2].

В качестве объекта исследования рассматривается ТПП малых серий изделий из полимерных термопластичных материалов литьем под давлением. Цель настоящей статьи — поиск путей сокращения длительности ТПП, а следовательно, и себестоимости полимерных изделий при мелкосерийном типе производства, когда длительность ТПП превышает длительность процесса литья требуемой партии.

Материалы и методы. Одним из этапов ТПП полимерных изделий методом литья является проектирование литевой формы, конструкция которой определяет протекание процесса заполнения формующей полости. Этот этап, важность которого обусловлена весомой долей накопленного в процессе производства полимерных изделий на каждом предприятии уникального опыта, может стать основой единой базы знаний.

Литевая форма представляет собой систему деталей, образующих рабочую полость, при заливке которой материалом формируется отливка. Отливка состоит из одного или нескольких отливаемых изделий и литниковой системы. Литниковой системой называют совокупность каналов, предназначенных для подвода расплава материала в форму, ее полного заполнения и питания отливки в процессе затвердевания. Литниковая система состоит из впускных и выпускных литниковых каналов, разводящих литниковых каналов, технологических приливов, а также центрального литникового канала: см. рис. 1, где 1 — отливаемое полимерное изделие, 2 — впускной литник, 3 — разводящий литник, 4 — центральный литник.

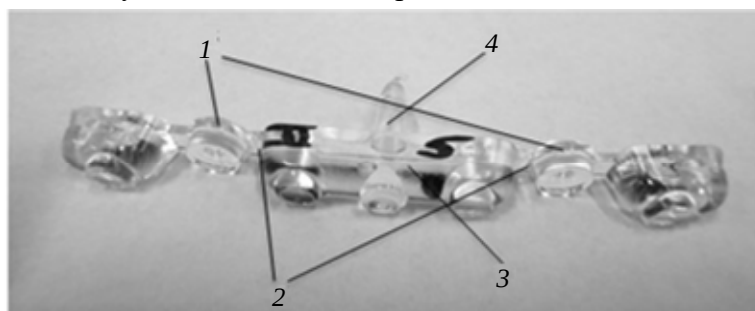


Рис. 1

Автоматизация проектирования литниковой системы является одной из сложных и трудноформализуемых задач вследствие разнообразия форм полимерных изделий. Одним из подходов к автоматизации процесса проектирования литниковой системы является параметрическое моделирование отливки на основе конструкторско-технологических и геометрических характеристик полимерного изделия. Параметры, описывающие данные характеристики, определяются автоматически из 3D-модели полимерного изделия.

Процесс проектирования литниковой системы для заданной полимерной детали может быть представлен как решение таких задач, как определение параметров литниковой системы и их оптимизация. Правильность конфигурации литниковой системы проверяется проливаемостью отливки, что может быть реализовано с использованием систем имитационного моделирования. На рынке программного обеспечения для решения задач имитационного моделирования процесса литья под давлением представлено множество зарубежных программных продуктов, реализующих 3D-метод анализа, являющийся стандартом отрасли [3], среди которых можно выделить: REM3D (Transvalor S.A, Франция), VISI Flow (Vero USA, Inc., США), Sigmasoft (SIGMA Engineering GmbH, Германия), Moldex3D (CoreTech System, Тайвань) и 3D TIMON (Toray Engineering Co., Япония) [4]. Одной из основных функций этих программ является оценка конфигураций литниковых систем отливки. Использование систем имитацион-

ного моделирования позволяет просчитывать различные варианты геометрии литниковых систем без проведения натурных экспериментов, что, в свою очередь, позволяет снизить стоимость ТПП. Однако применение современных информационных технологий (искусственного интеллекта), вероятно, может способствовать отказу от использования дорогостоящих систем имитационного моделирования.

Современные исследования в области проектирования литниковых систем и подбора параметров (режимов) литья направлены на разработку интеллектуальных систем и используют следующие подходы: метод рассуждений на основе прецедентов (CBR — Case-Based Reasoning), метод на основе экспертных систем, системы на основе нейронных сетей [5]. Несмотря на принципиальные различия алгоритмов, используемых в данных подходах, основой для каждого является база знаний.

Проектирование литевых форм для литья под давлением полимерных изделий на основе баз знаний [6] представляет собой основу метода проектирования с использованием искусственного интеллекта в литевом производстве. Применение метода рассуждений на основе прецедентов преобразует процесс проектирования литевой формы в модификацию предыдущих успешных прецедентов, хранящихся в базе знаний, для решения новых задач.

Автоматизированное проектирование литниковой системы литевой формы с параметрическим управлением [7] осуществляется на основе управления геометрическими параметрами с использованием стандартных шаблонов. Стандартные шаблоны для проектирования литниковой системы представляют собой различные конфигурации литниковых каналов. Применение шаблонов гарантирует, что требуемая конфигурация каналов может быть добавлена в модель конструкции литевой формы без необходимости перепроектирования формирующей полости.

Технология литья под давлением, вследствие стабильности этапов процесса (подготовка расплава полимерного материала, впрыск, выдержка под давлением, охлаждение и выталкивание), позволяет формировать группы конструктивно различающихся изделий, изготовление которых возможно с использованием конкретной модели литевого оборудования. Для данных групп изделий, с учетом параметров литевой машины (расстояние между колоннами, объем впрыска и пр.), целесообразно проектировать и изготавливать переналаживаемые литевые формы (ПЛФ). Это позволяет при переходе к производству нового полимерного изделия проектировать только комплект сменных формообразующих деталей (ФОД) и тем самым значительно сократить время ТПП. Для каждой ПЛФ существует предельный объем полости, который позволяет определить суммарные размеры комплекта ФОД (матрицы и пуансона).

Методика проектирования ФОД. Построение 3D-модели полимерной детали и параметризация этой модели — первоочередной этап при проектировании формообразующих деталей. На рис. 2 в качестве примера приведена параметрическая 3D-модель полимерной детали.

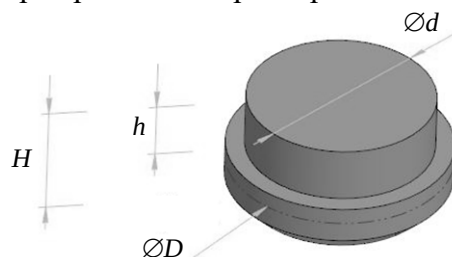


Рис. 2

При проектировании литниковой системы необходимо учитывать процент усадки, который зависит от характеристик материала отливаемого изделия. Для учета этого физического явления в системе автоматизированного проектирования должно производиться масштабирование трехмерной модели изделия.

Методику проектирования ФОД можно представить в виде следующих этапов [8—10]:

- 1) определение количества отливаемых полимерных изделий в одной отливке;
- 2) построение 3D-модели отливки;
- 3) выбор оборудования и ПЛФ в соответствии с параметрами отливки (объем, материал, габаритные размеры), определение суммарных предельных размеров комплекта ФОД [11];
- 4) формирование трехмерных моделей ФОД (матрицы и пуансона) посредством вычитания 3D-модели отливки из 3D-моделей комплекта ФОД;
- 5) построение дополнительных элементов (вентиляционных каналов, отверстий под толкатели, при необходимости отверстий под сменные знаки).

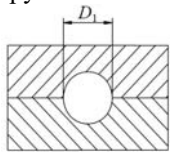
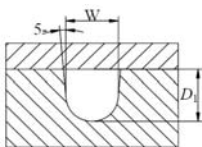
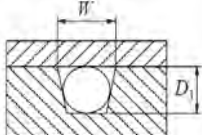
Решения, принимаемые на этапах 2, 3 и 5, зависят от геометрии полимерного изделия и требований к его поверхностям.

Этап построения 3D-модели отливки, в свою очередь, состоит из следующих шагов [12]:

- 1) определение положения точки впрыска;
- 2) определение положения плоскости разъема для извлечения отливки;
- 3) построение впускного литникового канала;
- 4) построение разводящих литниковых каналов;
- 5) построение центрального литникового канала;
- 6) определение количества и расположения толкателей;
- 7) построение технологических прибылей (при необходимости).

В качестве примера параметризации литниковой системы в табл. 1 приведены варианты конфигураций поперечных сечений разводящих каналов и условия принятия решения о применении каждого варианта [13].

Таблица 1

Тип поперечного сечения разводящего канала	Условия применения
Круглое сечение 	Потери тепла при данной форме литников минимальны, однако изготовление характеризуется дороговизной и сложностью; $D_1 = S_{\max} + 1,5 \text{ мм},$ где $S_{\max}$ — максимальная толщина стенки изделия, мм
Параболическое сечение 	Более технологичный вариант, чем круглое сечение, однако потери тепла больше; угол параболы — от 3 до 10°; $D_1 = S_{\max} + 1,5 \text{ мм},$ $W = D \cdot 1,25 \text{ мм}$
Трапецевидное сечение 	Альтернатива параболическому сечению, однако потери тепла больше. Формулы расчета аналогичны расчету параболического сечения

В результате исследования были выявлены характеристики (свойства) полимерного изделия, влияющие на принятие решений на различных этапах проектирования литниковой системы:

- объем изделия, определяет количество отливаемых изделий за один впрыск;
- материал изделия, влияет на выбор комплекта ФОД и оборудования для изготовления изделия;
- требования к поверхностям изделия, влияют на определение положения точки впрыска и плоскости разъема.

В табл. 2 представлены параметры литниковых каналов, определяемые параметрами полимерного изделия.

Таблица 2

Параметры полимерного изделия	Определяемые параметры для построения отливки												
Построение впускного литникового канала													
Материал	Глубина канала $h = H \cdot k,$ где k — коэффициент, зависящий от материала отливаемого изделия; H — характеристический размер канала, мм												
Объем	Характеристический размер канала $H = 2 \cdot V_{\text{и}} / A_{\text{и}},$ где $V_{\text{и}}$ — объем изделия, см ³ ; $A_{\text{и}}$ — площадь поверхности изделия, см ²												
Площадь поверхности матрицы	Ширина канала $b = k \frac{\sqrt{A}}{30},$ где A — площадь поверхности матрицы, мм ²												
Масса (m)	Если сечение канала имеет форму окружности или полуокружности, то его диаметр определяется следующей зависимостью: <table> <tr> <td>m, г</td><td>D_1, мм</td></tr> <tr> <td>0—5</td><td>0,5</td></tr> <tr> <td>5—10</td><td>0,62</td></tr> <tr> <td>10—20</td><td>0,75</td></tr> <tr> <td>20—40</td><td>1</td></tr> <tr> <td>40—100</td><td>1,25</td></tr> </table>	m , г	D_1 , мм	0—5	0,5	5—10	0,62	10—20	0,75	20—40	1	40—100	1,25
m , г	D_1 , мм												
0—5	0,5												
5—10	0,62												
10—20	0,75												
20—40	1												
40—100	1,25												
Построение разводящего литникового канала													
Максимальная толщина стенки	Глубина канала $h = S_{\text{max}} + 1,5$ мм, ширина канала $W = D \cdot 1,25$ мм												

Заключение. Анализ научной литературы, посвященной описанной в статье проблеме, позволяет сделать следующие выводы:

- в большинстве методик построения формообразующих деталей не используются параметрические возможности современных САПР;
- параметрическая модель изделия позволяет построить полностью зависящую от параметров полимерного изделия модель отливки;
- использование функционала систем автоматизированного проектирования позволяет сократить сроки технологической подготовки производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков А. М., Макарова М. И., Плетнева Е. М. Алгоритм проектирования группового технологического процесса механической обработки деталей // Обработка металлов. 2012. № 4(57). С. 5—9.
2. Митрофанов С. П. Особенности групповой технологии механической обработки в современных условиях. СПб: УН-Т ИТМО, 2001.
3. Барвинский И. Экспертиза инженерных расчетов литья термопластов под давлением // Полимерные технологии. 2018. № 2. С. 22—29.
4. Пирогов А. В. Разработка и моделирование процессов технологической подготовки производства изделий из полимерных оптических материалов: дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2014.
5. Gao H. Intelligent methods for the process parameter determination of plastic injection molding // Frontiers of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 13. P. 85—95.
6. Mok C. K., Hua M., Wong S. Y. A hybrid case-based reasoning CAD system for injection mould design // Intern. Journal of Production Research. 2008. N 46:14. P. 3783—3800. DOI: 10.1080/00207540601103100.

7. Low M., Lee K. A Parametric-Controlled Cavity Layout Design System for a Plastic Injection Mould // Intern. Journal of Advanced Manufact. Techn. 2003. N 21. P. 807—819. DOI: 10.1007/s00170-002-1397-9.
8. Басов К. И., Брагинский В. А., Казанков Ю. В. Формующий инструмент для изготовления изделий из полимерных материалов. М.: Химия, 1991.
9. Казмер Д. О. Разработка и конструирование литьевых форм / Пер. с англ.; под. ред. В. Г. Дувидзона. СПб: Изд-во „Профессия“, 2011.
10. Крыжановский В. К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 204 с.
11. Талапов В. В., Тимофеева О. С., Помпеев К. П. Разработка алгоритма и определение критериев выбора материала формообразующих деталей // „Инновации на транспорте и в машиностроении“: Сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 28—29 апр. 2016 г. 2016. Т. 3. С. 138142.
12. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как делать литьевые формы / Пер. с англ.; под ред. В. Г. Дувидзона, Э. Л. Калинцева. СПб: Изд-во „Профессия“, 2007. 639 с.
13. Rutkauskas Ž., Bargelis A. Knowledge-based method for gate and cold runner definition in injection mold design // Mechanika. 2007. Vol. 66, N 4.

Сведения об авторах

- | | |
|-----------------------------------|--|
| Максим Геннадьевич Лопатов | — студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: max.lopatov@rambler.ru |
| Артемию Валерьевич Чукичев | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: avchukichev@itmo.ru |
| Ольга Сергеевна Тимофеева | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: otimofeeva@itmo.ru |

Поступила в редакцию 09.09.22; одобрена после рецензирования 29.09.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Markov A.M. *Algoritm proyektirovaniya gruppovogo tekhnologicheskogo protsessa mekhanicheskoy obrabotki detaley* (Algorithm for Designing a Group Technological Process of Machining Parts), Barnaul, 2012. (in Russ.)
2. Mitrofanov S.P. *Osobennosti gruppovoy tekhnologii mekhanicheskoy obrabotki v sovremennykh usloviyakh* (Features of Group Machining Technology in Modern Conditions), St. Petersburg, 2001. (in Russ.)
3. Barvinsky I. *Polymer materials. Products, equipment, technology*, 2018, no. 2, pp. 22–29. (in Russ.)
4. Pirogov A.V. *Razrabotka i modelirovaniye protsessov tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva izdeliy iz polimernykh opticheskikh materialov* (Development and Modeling of the Processes of Technological Preparation for the Production of Products from Polymeric Optical Materials), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2014. (in Russ.)
5. Gao H. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 13, pp. 85–95.
6. Mok C.K., Hua M. & Wong S.Y. *International Journal of Production Research*, 2008, no. 14(46), pp. 3783–3800, <https://doi.org/10.1080/00207540601103100>.
7. Low M., Lee K. *Int. Journ. Adv. Manufac. Tech.*, 2003, vol. 21, pp. 807–819, <https://doi.org/10.1007/s00170-002-1397-9>.
8. Basov K.I., Braginsky V.A., Kazankov Yu.V. *Formuyushchiy instrument dlya izgotovleniya izdeliy iz polimernykh materialov* (Forming Tool for the Manufacture of Products from Polymeric Materials), Moscow, 1991. (in Russ.)
9. Kazmer D.O. *Injection Mold Design Engineering*, Hanser Publications, 553 p.
10. Kryzhanovsky V.K. *Inzhenernyy vybor i identifikatsiya plastmass* (Engineering Selection and Identification of Plastics), St. Petersburg, 2009, 204 p. (in Russ.)
11. Talapov V.V., Timofeeva O.S., Pompeev K.P. *Innovatsii na transporte i v mashinostroyenii* (Innovations in Transport and Mechanical Engineering), Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, April 28–29, 2016, vol. 3, pp. 138–142. (in Russ.)
12. Menges G., Michaeli W., Mohren P. *How to make injection molds*, Hanser Publishers, Munich, 2001.
13. Rutkauskas Ž., Bargelis A. *Mechanika*, 2007, no. 4(66).

Data on authors

- | | |
|----------------------------|--|
| Maksim G. Lopatov | — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: max.lopatov@rambler.ru |
| Artemy V. Chukichev | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: avchukichev@itmo.ru |
| Olga S. Timofeeva | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: otimofeeva@itmo.ru |

Received 09.09.22; approved after reviewing 29.09.22; accepted for publication 25.01.23.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF NOTES

УДК 612.82; 159.931; 004.93
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-247-250

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ СТИМУЛОВ ПО ЕДИНИЧНЫМ ВЫЗВАННЫМ ПОТЕНЦИАЛАМ НА ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЕ

М. Я. МАРУСИНА*, И. В. БУРДАЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*myamarusina@itmo.ru

Аннотация. Обоснована необходимость повышения эффективности автоматической классификации зрительных стимулов по единичным вызванным потенциалам на электроэнцефалограмме испытуемого. Определены факторы, влияющие на точность распознавания вида предъявляемых зрительных стимулов (живой/неживой, четкий/размытый). Представлен алгоритм обработки данных, позволяющий выявлять значимые различия амплитуд единичных вызванных потенциалов.

Ключевые слова: распознавание единичных вызванных потенциалов, методы глубокого обучения, искусственные нейронные сети

Ссылка для цитирования: Марусина М. Я., Бурдаев И. В. Автоматическое распознавание зрительных стимулов по единичным вызванным потенциалам на электроэнцефалограмме // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 247—250. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-247-250.

AUTOMATIC RECOGNITION OF VISUAL STIMULES BY SINGLE EVOKED POTENTIALS ON AN ELECTROENCEPHALOGRAM

M. Ya. Marusina*, I. V. Burdaev

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*myamarusina@itmo.ru

Abstract. The necessity of increasing the efficiency of automatic classification of visual stimuli by single evoked potentials on the observer's electroencephalogram is substantiated. The factors affecting the accuracy of recognition of the type of presented visual stimuli (living/non-living, clear/blurred) are determined. A data processing algorithm is developed that makes it possible to identify significant differences in the amplitudes of single evoked potentials.

Keywords: recognition of single evoked potentials, deep learning methods, artificial neural networks

For citation: Marusina M. Ya., Burdaev I. V. Automatic recognition of visual stimuli by single evoked potentials on an electroencephalogram. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 247—250 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-247-250.

В настоящее время попытки автоматической классификации электроэнцефалографических сигналов (ЭЭГ) для разработки неинвазивных интерфейсов мозг-компьютер (ИМК) исчисляются сотнями [1]. Расширение научных, прикладных и промышленных областей применения ИМК определяет необходимость классификации ЭЭГ-сигналов с высокой точностью и в режиме онлайн. Основные проблемы заключаются в низком соотношении сигнал/шум [2] и высокой вариативности ЭЭГ в зависимости от человека [3].

При создании различных автоматических устройств распознавания часто возникает задача детектирования заданной цели, где важно принять решение по одномоментному появлению сигнала. В медицинской диагностике, когда невозможно накопить большое количество волн вызванных потенциалов (ВП), ставят диагноз по анализу отдельных (единичных) вызванных потенциалов, например, пациентам с психическими заболеваниями [4]. Эффективное использование таких автоматических классификаторов ограничено сложностью распознавания при небольшой амплитуде сигнала. Амплитуда единичного ВП (5—15 мкВ) меньше амплитуды ЭЭГ испытуемого, пребывающего в состоянии бодрствования (20—70 мкВ) [4].

Целью исследования является повышение эффективности автоматического распознавания зрительных стимулов по единичным вызванным потенциалам на ЭЭГ испытуемого на основе повышения точности классификации.

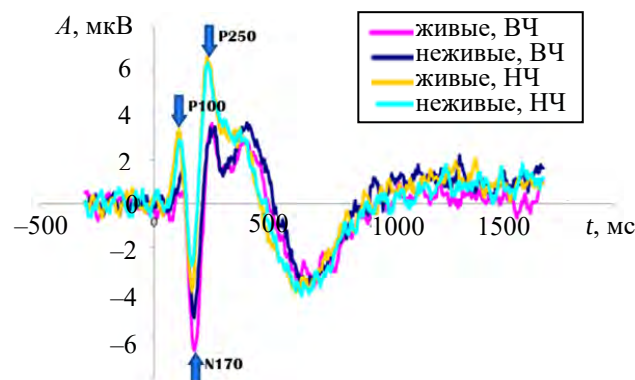
В ходе анализа существующих решений определено, что точность распознавания вида зрительных стимулов зависит от следующих факторов: использованных методов обучения классификатора (методов машинного обучения для извлечения признаков, выбранных для распознавания) [5]; вида функции ядра классификатора; вида извлекаемых признаков [6—10]; выбранных временных интервалов; частоты дискретизации сигнала; числа и расположения электродов (выбранных каналов ЭЭГ: лобная, теменная, височная, центральная или затылочная область); вида решаемой задачи [4]. Сверточные нейронные сети глубокого обучения, применяемые непосредственно к отсчетам исходного сигнала, по мнению авторов [11], являются наиболее эффективными методами машинного обучения для распознавания ЭЭГ-сигналов. Причем сверточные архитектуры позволяют эффективно выявлять признаки, разнесенные во времени [12].

Испытуемому случайным образом предъявлялись 180 тестовых изображений живой и неживой природы, отфильтрованных на высоких (четкое) и низких (размытое) частотах (ВЧ и НЧ). Задача заключалась в разделении живых/неживых и четких/размытых объектов.

Был проведен сравнительный анализ амплитуды вызванных потенциалов в выбранных интервалах времени для каждого из 19 электродов. Определены области мозга, в которых получены статистически значимые различия по амплитуде в компонентах вызванных потенциалов при классификации испытуемым семантических (живой/неживой) и пространственно-частотных (высокочастотных/низкочастотных) характеристик объектов.

На рисунке приведены статистические данные по отведению О2 (затылочная область). После предъявления зрительного стимула в интервале 100—300 мс на ЭЭГ наблюдалось различие амплитуд волн единичных вызванных потенциалов в компонентах P100, P 250 и N 170. Значимое различие амплитуд ЭЭГ-сигналов в этих компонентах было зафиксировано при предъявлении испытуемому высокочастотных и низкочастотных стимулов.

При анализе единичных вызванных потенциалов, для получения надежных результатов, исследования должны проводиться на представительных выборках и с учетом особенностей зрительной системы наблюдателя.



В ходе исследования разработан алгоритм обработки данных, позволяющий выявлять значимые различия амплитуд единичных вызванных потенциалов на ЭЭГ при определении испытуемым вида предъявляемых зрительных стимулов. Сравнение различных методов распознавания единичных вызванных потенциалов показало, что сверточная нейронная сеть является наиболее эффективным способом определения вида предъявляемого стимула.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капралов Н. В., Нагорнова Ж. В., Шемякина Н. В. Методы классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 1, вып. 20. С. 94—132 DOI: org/10.15622/ia.2021.20.1.4.
2. Lotte F. et al. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update // Journal Neural Eng. 2018. Vol. 15, N 3. P. 031005.
3. Zhao X., Zhao J., Liu C., Cai W. Deep Neural Network with Joint Distribution Matching for Cross-Subject Motor Imagery Brain-Computer Interfaces // BioMed. Res. Intern. 2020. Vol. 2020, N 7285057.
4. Пономарев С. В., Малашин Р. О., Моисеенко Г. А. Автоматическая классификация зрительных стимулов по электроэнцефалограмме наблюдателя // Оптич. журн. 2018. № 8. С. 67—76.
5. Spaminato C., Palazzo S., Kavasidis I., Shah M. Deep learning human mind for automated visual classification // CVPR. 2017 [Электронный ресурс]: <https://arxiv.org/abs/1609.00344>.
6. Анодина-Андреевская Е. М., Божокин С. В., Марусина М. Я., Полонский Ю. З., Суворов Н. Б. Перспективные подходы к анализу информативности физиологических сигналов и медицинских изображений человека при интеллектуальной деятельности // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 7. С. 27—35.
7. Kiryakova T. N., Marusina M. Ya., Fedchenkov P. V. Automatic methods of contours and volumes determination of zones of interest in MRI images // REJR. 2017. N 7 (2). P. 117—127. DOI: 10.21569 / 2222-7415-2017-7-2-117-127.
8. Marusina M. Ya., Karaseva E. A. Automatic Segmentation of MRI Images in Dynamic Programming Mode // Asian Pacific Journal of Cancer Prevention (APJCP). 2018. N 19(10). P. 2771—2775. DOI: 10.22034 / APJCP.2018.19.10.2771.
9. Marusina M. Y., Mochalina A. P., Frolova E. P., Satikov V. I., Barchuk A. A., Kuznetsov V. I., Gaidukov V. S., Tarakanov S. A. MRI Image Processing Based on Fractal Analysis // Asian Pacific Journal of Cancer Prevention (APJCP). 2017. N 18 (1). P. 51—55. DOI: 10.22034/APJCP.2017.18.1.51.
10. Marusina M. Ya., Karaseva E. A. Application of fractal analysis for estimation of structural changes of tissues on MRI images // REJR. 2018. N 8 (3). P. 107—112. DOI: 10.21569 / 2222-7415-2018-8-3-107-112.
11. Tang Z., Sun S. Single-trial EEG classification of motor imagery using deep convolutional neural networks // Optik — Intern. Journal for Light and Electron Optics. 2017. Vol. 130. P. 11—18.
12. Malashin R. O. Extraction of object hierarchy data from trained deep-learning neural networks via analysis of the confusion matrix // Journal of Optical Technology. 2016. Vol. 83. N 10. P. 599—603.

Сведения об авторах

- Мария Яковлевна Марусина** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: myamarusina@itmo.ru
- Игорь Владиславович Бурдаев** — студент; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: burdaev-igor@mail.ru

Поступила в редакцию 17.10.22; одобрена после рецензирования 25.10.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Kapralov N., Nagornova Zh., Shemyakina N. *Informatics and Automation*, 2021, no. 1(20), pp. 94—132, DOI: https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.1.4
2. Lotte F. et al. *J. Neural. Eng.*, 2018, no. 3(15), pp. 031005.
3. Zhao X., Zhao J., Liu C., Cai W. *Biomed. Res. Int.*, 2020, vol. 2020, pp. 7285057
4. Ponomarev S.V., Malashin R.O., Moiseenko G.A. *Journal of Optical Technology*, 2018, no. 8, pp. 499—506.
5. Spaminato C., Palazzo S., Kavasidis I., Shah M. *CVPR*, 2017, https://arxiv.org/abs/1609.00344.
6. Anodina-Andrievskaya E.M., Bozhokin S.V., Marusina M.Ya., Polonsky Yu.Z., Suvorov N.B. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 7(54), pp. 27—35. (in Russ.)

7. Kiryakova T.N., Marusina M.Ya., Fedchenkov P.V. *REJR*, 2017, no. 2(7), pp. 117–127, DOI: 10.21569 / 2222-7415-2017-7-2-117-127.
8. Marusina M.Ya., Karaseva E.A. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 2018, no. 10(19), pp. 2771–2775, DOI: 10.22034 / APJCP.2018.19.10.2771.
9. Marusina M.Y., Mochalina A.P., Frolova E.P., Satikov V.I., Barchuk A.A., Kuznetsov V.I., Gaidukov V.S., Tarakanov S.A. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 2017, no. 1(18), pp. 51–55, DOI: 10.22034/APJCP.2017.18.1.51.
10. Marusina M.Ya., Karaseva E.A. *REJR*, 2018, no. 3(8), pp. 107–112, DOI: 10.21569/2222-7415-2018-8-3-107-112.
11. Tang Z., Sun S. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, vol. 130, pp. 11–18.
12. Malashin R.O. *Journal of Optical Technology*, 2016, no. 10(83), pp. 599–603.

Data on authors

- | | | |
|---------------------------|---|---|
| Maria Ya. Marusina | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: myamarusina@itmo.ru |
| Igor V. Burdaev | — | Student; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems;
E-mail: burdaev-igor@mail.ru |

Received 17.10.22; approved after reviewing 25.10.22; accepted for publication 25.01.23.

**ЦЕНТРИРОВАНИЕ ЛИНЗ С АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
ПРИ ИХ ФОРМООБРАЗОВАНИИ
НА СТАНКЕ АЛМАЗНОГО МИКРОТОЧЕНИЯ****В. М. МЕДУНЕЦКИЙ^{1*}, С. В. СОЛК², О. А. ЛЕБЕДЕВ²**¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* vm57med@yandex.ru

²Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Сосновый Бор, Ленинградской обл., Россия

Аннотация. Рассмотрена технология центрирования инфракрасных линз с одной асферической поверхностью. Операция центрирования совмещена с формообразованием асферической поверхности на станке алмазного микроточения. Приведены рекомендации по заданию допусков на толщину линз и воздушные промежутки в инфракрасных объективах при использовании данной технологии.

Ключевые слова: центрировка линз, алмазное микроточение, асферическая поверхность, инфракрасная оптико-механическая система, инфракрасный объектив

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Солк С. В., Лебедев О. А. Центрирование линз с асферическими поверхностями при их формообразовании на станке алмазного микроточения // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 251—254. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-251-254.

**CENTERING LENSES WITH ASPHERICAL SURFACES
DURING THEIR SHAPING
ON A DIAMOND MICRO-TURNING MACHINE****V. M. Medunetsky^{1*}, S. V. Solk², O. A. Lebedev²**¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

* vm57med@yandex.ru

²JSC Research Institute of Optoelectronic Instrumentation,
Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract. A technology of centering IR lenses with one aspherical surface is considered. The centering procedure is combined with shaping the aspherical surface on a diamond micro-turning machine. Recommendations are given on setting tolerances for lens thickness and air gaps in IR lenses when using this technology.

Keywords: lens centering, diamond turning, aspherical surface, IR optomechanical system, IR objective

For citation: Medunetsky V. M., Solk S. V., Lebedev O. A. Centering lenses with aspherical surfaces during their shaping on a diamond micro-turning machine. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 3. P. 251—254 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-251-254.

В настоящее время широкое распространение получают инфракрасные (ИК) приборы, используемые в научных исследованиях, медицине, военном деле, охранной деятельности и других областях [1]. Качественный скачок в производстве инфракрасных фотоприемных устройств позволил увеличить их формат и уменьшить размеры пиксела [2], что вызвало повышение требований к качеству и техническим характеристикам оптических элементов и оптико-механических систем (ОМС). В ОМС широко используются линзы с асферическими поверхностями. К оптическим элементам, изготовленным из материалов с большими показателями преломления и высокой светосилой, предъявляются повышенные требования к центрированию [3].

Центрирование линз с асферической поверхностью является нетривиальной задачей. Это связано с тем, что асферическая поверхность, в отличие от сферической, имеет одну ось симметрии. Это приводит к тому, что совместить оси сферической и асферической поверхностей невозможно [4].

На сегодняшний день наиболее точной и производительной технологией асферизации оптических элементов является технология алмазного микроточения (АМТ) [5, 6]. В работе [7] показано применение совмещенной технологии при изготовлении однолинзового объектива. Формообразование асферической поверхности осуществляется на станке АМТ после формообразования сферической поверхности и установки линзы в оправу с предварительным центрированием. Однако такой подход требует специальной конструкции оправы и линзы для обеспечения „выхода резца“.

На практике чаще всего технологический процесс построен по следующей схеме. На станке АМТ осуществляется формообразование асферической поверхности, а затем формообразование сферической с контролем „разнотолщинности“ линзы по краю механическим способом. Такая последовательность позволяет выполнить заготовку линзы с большим припуском по толщине и при необходимости произвести большое количество циклов АМТ для коррекции формы и шероховатости обрабатываемой поверхности для получения требуемых характеристик. Технологические процессы шлифования и полирования ИК-линз хорошо отработаны и позволяют получать толщину линзы по центру с точностью 0,005—0,01 мм.

Однако выполнение требования по „разнотолщинности“ не гарантирует отсутствие у асферической поверхности линейных и угловых децентрировок, так как они компенсируют друг друга, и процесс приобретает вероятностный характер.

Более целесообразным является следующий порядок операций. Заготовка линзы 4 (рис. 1) с изготовленной сферической рабочей поверхностью *A* и цилиндрической базовой поверхностью *C* закрепляется в приспособлении: например, приклеивается с помощью смолы или воска, при предварительно защищенной лаком поверхности *A*, таким образом, чтобы на краю поверхности *A* и на поверхности *C* можно было разместить датчики линейных перемещений 6. Приспособление устанавливается в центрировочном патроне 2, который, в свою очередь, закрепляется в шпинделе станка АМТ 1. Центрировочный патрон имеет две линейные (*X* и *Y*) и две угловые (ψ и Ω) подвижки. С помощью юстировочных подвижек центрировочного патрона устраняются биения поверхностей *A* и *C* с контролем датчиками линейных перемещений. Затем осуществляется формообразование асферической поверхности *B* резцом из природного алмаза 5, что позволяет не выполнять дополнительное центрирование линзы.

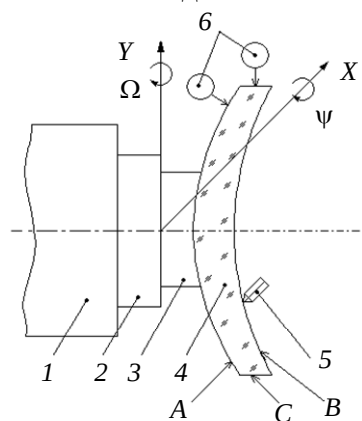


Рис. 1

Недостатком такого подхода является сложность обеспечения жесткого допуска на толщину линзы. Этот недостаток может быть компенсирован тем, что на стадии оптического расчета предусмотрена возможность коррекции воздушных промежутков в зависимости от фактической толщины линзы. На рис. 2 показана схема двухлинзового ИК-объектива для

спектрального диапазона 8—12 мкм, с фокусным расстоянием 75 мм, относительным отверстием 1:1, полем зрения 6°. Кружки рассеяния для концентрации энергии 80 % в центре и по полю составляют соответственно 33 и 37 мкм. Линзы 1 и 2 изготавливаются из германия и имеют асферические поверхности *D* и *E*. Допуск на толщину обеих линз задается в пределах $\pm 0,1$ мм. После изготовления линз их толщина измеряется с точностью до $\pm 0,005$ мм, а по результатам оптических расчетов корректируется величина воздушного промежутка между линзами в пределах 1 мм с точностью $\pm 0,015$ мм.

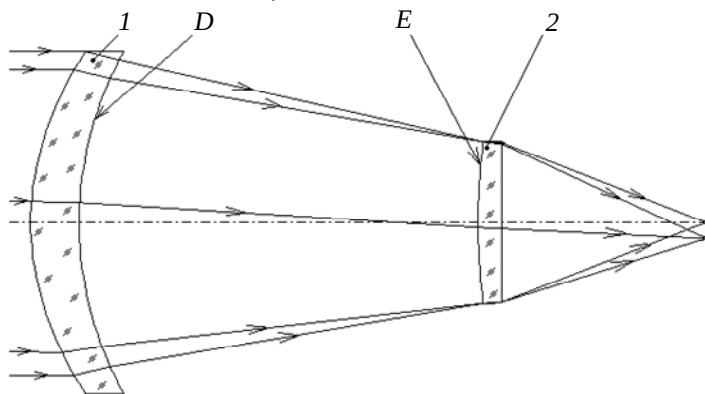


Рис. 2

В заключение следует отметить, что описанная выше технология может применяться при создании оптических приборов, которые работают в видимом и ближнем ИК-диапазонах. При этом можно использовать материалы, обработка которых возможна с помощью АМТ, к примеру, германий для ИК-диапазона [6] и полиметилметакрилат для видимого диапазона [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
2. Старцев В., Наумов А. Современные фотоприемные устройства инфракрасного спектра и тенденции развития // Технологии защиты. 2018. № 5. С. 66—70.
3. Вычислительная оптика: Справочник / Под общ. ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
4. Справочник технолога-оптика / Под ред. М. А. Окатова. СПб: Политехника, 2004. 679 с.
5. Медунецкий В. М., Солк С. В. Опыт применения и перспективы технологии алмазного микроточения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. Т. 89, № 1. С. 165—170.
6. Васильева Л. В., Лебедев О. А., Нужин В. С., Солк С. В. Проектирование и изготовление линзовых объективов для работы в инфракрасной области спектра // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 4. С. 72—75.
7. Солк С. В., Сабинин В. Е. Новые области применения технологии алмазного микроточения // Оптич. журн. 2005. Т. 72, № 11. С. 82—85.
8. Сабинин В. Е., Солк С. В. Проблемы проектирования и изготовления оптики из полимерных материалов // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 1. С. 61—64.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — д-р техн. наук; НИИ оптико-электронного приборостроения; заместитель начальника отдела; E-mail: solk@sbor.net
- Олег Анатольевич Лебедев** — НИИ оптико-электронного приборостроения; ведущий инженер-расчетчик; E-mail: oleg.dr-lebedev@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.09.22; одобрена после рецензирования 14.11.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnyye sistemy smotryashchego tipa* (Infrared Viewing Systems), Moscow, 2004, 444 p. (in Russ.)
2. Startsev V., Naumov A. *Tekhnologii zashchity*, 2018, no. 5, pp. 66–70. (in Russ.)
3. Rusinov M.M., ed., *Vychislitel'naya optika: Spravochnik* (Computational Optics: A Handbook), Leningrad, 1984, 423 p. (in Russ.)
4. Okatov M.A., ed., *Spravochnik tekhnologa-optika* (Reference Technologist-Optics), St. Petersburg, 2004, 679 p. (in Russ.)
5. Medunetsky V.M., Solk S.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1(89), pp. 165–170. (in Russ.)
6. Vasil'eva L.V., Lebedev O.A., Nuzhin V.S., Solk S.V. *Journal of Optical Technology*, 2003, no. 4(70), pp. 280–283.
7. Solk S.V., Sabinin V.E. *Journal of Optical Technology*, 2005, no. 11(72), pp. 875–877.
8. Sabinin V.E., Solk S.V. *Journal of Optical Technology*, 2002, no. 1(69), pp. 48–50.

Data on authors

Viktor M. Medunetskiy	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University; E-mail: vm57med@yandex.ru
Sergey V. Solk	—	Dr. Sci.; JSC Research Institute of Optoelectronic Instrumentation; Deputy Head of Department; E-mail: solk@sbior.net
Oleg A. Lebedev	—	JSC Research Institute of Optoelectronic Instrumentation; Leading Calculation Engineer; E-mail: oleg.dr-lebedev@yandex.ru

Received 22.09.22; approved after reviewing 14.11.22; accepted for publication 25.01.23.