ISSN 2500—0381
Электронная версия

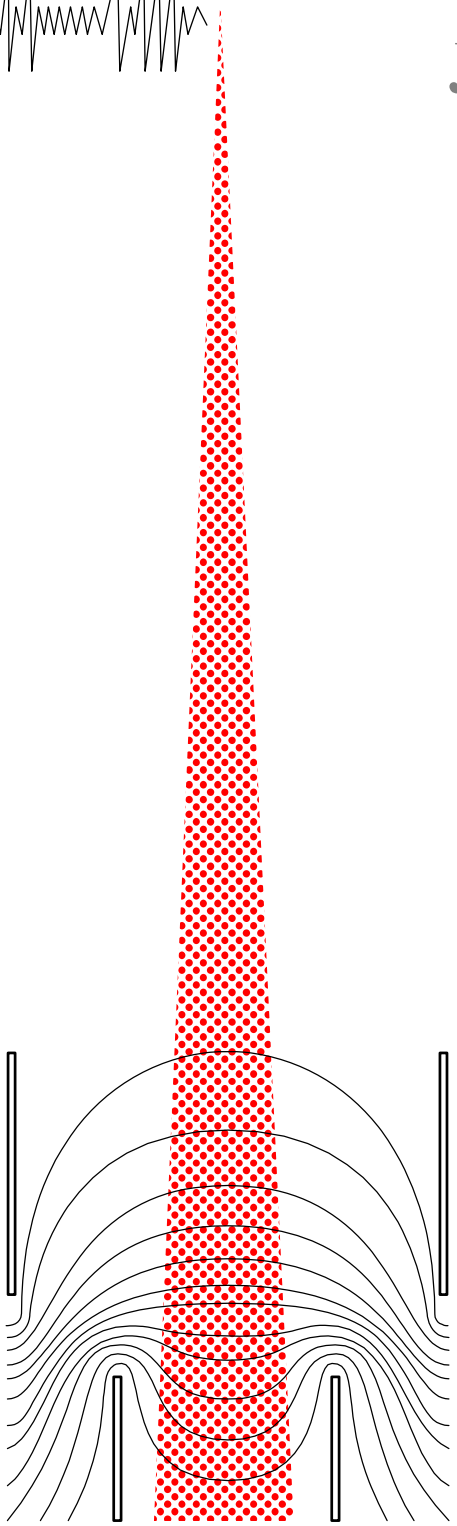
ISSN 0021—3454
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 4
Т. 66
2023



Journal of Instrument Engineering

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., главный научный сотрудник, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ „Авангард“», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *Л. Г. Позднякова*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

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

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

Подписано в печать 21.04.2023 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

© „Известия вузов. Приборостроение“, 2023

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.

Требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала http://pribor.itmo.ru/

Индекс 70374

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

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

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

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

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

— экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (формат PDF);

— файлы рукописи статьи, оформленные в соответствии с требованиями журнала;

— сведения об авторах, заполненные по шаблону (на русском и английском языке);

— договор о передаче авторских прав.

Рукопись должна содержать:

— название статьи (на русском и английском языке), индекс УДК;

— аннотацию (150—250 слов, на русском и английском языке), ключевые слова (не менее 5 и не более 25, на русском и английском языке), основной текст, список литературы;

— рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

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

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

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

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

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

Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

Плата за публикацию не взимается.

ISSN 0021–3454. Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66 № 4. С. 255—349.

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

ТОМ 66 **АПРЕЛЬ 2023** **№ 4**

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Аверьянов А. В., Кошель И. Н., Кузнецов В. В., Нгуен В. Т. Статистическое оценивание метрик машинных команд ЭВМ и реализующих их микрокоманд на основе анализа Парето 259

Пыркин А. А., Бобцов А. А., Нгуен Х. Т. Алгоритм адаптивного оценивания параметров для класса нелинейных нестационарных систем 266

Ватутин М. А., Ключников А. И. Математическая модель погрешности компенсационного акселерометра 276

Никишин К. И. Метод передачи данных в программно-конфигурируемых сетях с использованием планировщика и контроля доставки 285

Сасункевич А. А. Оценивание параметров ориентации орбитального объекта по результатам наблюдения космическим роботом с использованием алгоритмов технического зрения 297

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

Дармороз Д. Д., Пивень А. О., Орлова Т. Метод оптической молекулярной генерации локализованных хиральных структур в фотоактивных жидкокристаллических пленках 306

Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Пушкина В. П. Математическое моделирование выходного сигнала при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы анализа интерферограмм Математическое моделирование выходного сигнала при разной геометрии апертур 313

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

Беспалько А. В., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц. Численное и экспериментальное моделирование акустоэлектрического метода неразрушающего контроля твердотельных диэлектриков 320

Чобанзаде И. Г., Бабаханов А. Э. Вопросы разработки оптоволоконного кюветного измерителя концентрации метана в воздухе в нефтегазовом производстве 335

МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Мамиконян Б. М. Метрологический анализ цифрового измерителя разности температур с применением термопреобразователей сопротивления 342

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., Chief Researcher, IPMash RAS, 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. Lebetskaya*
Editor *Lidia G. Pozdniakova*
Page-proof, makeup *Maria V. Gerasimova*
Translation of *Yuriy I. Kopilevich*

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

Tel: (812) 480-02-73
Site: pribor.ifmo.ru
E-mail: pribor@itmo.ru

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 66 **APRIL 2023** **№ 4**

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

Averyanov A. V., Koshel I. N., Kuznetsov V. V., Nguyen V. T. Statistical Estimation of Computer Instructions Metrics and Micro Commands Implementing Them Based on Pareto Analysis 259

Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Nguen K. T. Algorithm of Adaptive Estimation of Parameters for a Class of Nonlinear Non-Stationary Systems 266

Vatutin M. A., Klyuchnikov A. I. Mathematical Model of the Error of the Compensation Accelerometer 276

Nikishin K. I. Method of Data Transmission in Software-Defined Networks Using a Scheduler and Rate Control 285

Sasunkevich A. A. Estimation of Orbital Object Orientation Parameters Based on Results of Space Robot Observation Using Machine Vision Algorithms 297

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Darmoroz D. D., Piven A. O., Orlova T. Method for Optical Molecular Generation of Localized Chiral Structures in Photoactive Liquid Crystal Films 306

Maiorov E. E., Arefiev A. V., Borodyansky Yu. M., Guliyev R. B., Dagaev A. V., Pushkina V. P. Mathematical Modeling of the Output Signal for Different Photodetector Aperture Geometries in Interference System of Interferogram Analysis 313

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

Bespalko A. V., Dann D. D., Fedotov P. I., Dmitrieva S. A., Luo J. Numerical and Experimental Modeling of the Acoustic-Electrical Method for Non-Destructive Testing of Solid-State Dielectrics 320

Chobanzade I. G., Babakhanov A. E. Issues of Developing a Fiber-Optic Cuvette Meter for the Concentration of Methane in the Air in Oil and Gas Industry 335

METROLOGY AND METROLOGICAL SUPPORT

Mamikonyan B. M. Metrological Analysis of a Digital Temperature Difference Meter Using Thermal Resistance Converters 342

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 overstimate in the text) — big, with a maximum fill;

— the recommendation of the Department (laboratory);

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

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

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

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

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

Don’t insert formulas from MathCad or MatLab!

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

Editorial Staff

УДК 621.396.6
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-259-265

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ МЕТРИК МАШИННЫХ КОМАНД ЭВМ И РЕАЛИЗУЮЩИХ ИХ МИКРОКОМАНД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАРЕТО

А. В. Аверьянов*, И. Н. Кошель, В. В. Кузнецов, В. Т. Нгуен

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
**vka_24kaf1@mail.ru*

Аннотация. Определены метрики, позволяющие анализировать частоту использования машинных команд на примере 50 программ в машинных кодах учебной ЭВМ. Установленные в процессе анализа проценты использования и повторения микрокоманд при реализации микропрограммного управления подтверждают применимость принципа „20/80“ — принципа Парето для работы процессоров. Сделан вывод об избыточности системы команд ЭВМ, которая приводит к усложнению архитектуры процессоров. Выявлены группы команд и микрокоманд с минимальным числом повторений (значимости), часть из которых может быть удалена с целью упрощения архитектуры ЭВМ.

Ключевые слова: *архитектура ЭВМ, анализ, диаграмма и принцип Парето, программная модель ЭВМ, метрики машинных команд, система команд, мнемокоды, микропрограмма*

Ссылка для цитирования: *Аверьянов А. В., Кошель И. Н., Кузнецов В. В., Нгуен В. Т.* Статистическое оценивание метрик машинных команд ЭВМ и реализующих их микрокоманд на основе анализа Парето // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 259—265. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-259-265.

STATISTICAL ESTIMATION OF COMPUTER INSTRUCTIONS METRICS AND MICRO COMMANDS IMPLEMENTING THEM BASED ON PARETO ANALYSIS

A. V. Averyanov*, I. N. Koshel, V. V. Kuznetsov, V. T. Nguyen

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
**vka_24kaf1@mail.ru*

Abstract. On the example of 50 programs in the machine codes for an educational computer, metrics are defined that allow analyzing the frequency of use of machine instructions. The percentages of microinstructions used and repeated during micro-program control implementation established during the analysis, confirm the applicability of the 20/80 principle - the Pareto principle for processor operation. A conclusion is made about the redundancy of the system of computer commands, which leads to the complication of the processors architecture. Groups of instructions and microinstructions with a minimum number of repetitions (significance) are identified, and some of them can be removed in order to simplify the computer architecture.

Keywords: computer architecture, analysis, Pareto diagram and principle, program model of computer, metrics of machine instructions, system of commands, mnemonic codes, microprogram

For citation: Averyanov A. V., Koshel I. N., Kuznetsov V. V., Nguyen V. T. Statistical estimation of computer instructions metrics and micro commands implementing them based on Pareto analysis. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 259—265 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-259-265.

© *Аверьянов А.В., Кошель И. Н., Кузнецов В. В., Нгуен В. Т., 2023*

В сфере контроля качества для классификации проблем качества на немногочисленные существенно важные и многочисленные несущественные используется метод Парето. Анализ Парето относится к статистическим методам повышения качества, в его основе лежит процесс построения диаграммы — кумулятивной кривой Парето, позволяющей определить немногочисленные, но значимые факторы [1, 2]. Эта кривая описывает функцию распределения Парето, которая в теории вероятностей относится к усеченным непрерывным двухпараметрическим распределениям* [3]. Это распределение используется в исследовании научных, экономических, социальных, геофизических проблем и многих других видов наблюдаемых явлений. Вне области экономики это распределение называется также распределением Брэдфорда, в лингвистике оно известно под именем закона Цапфа.

Использование диаграммы Парето позволило выявить, что устранение в процессе проектирования, производства и эксплуатации интегральных микросхем факторов, приводящих к дефектам металлизации и к дефектам внутренних межэлементных соединений и контактов, приведет к двукратному сокращению количества отказов этих микросхем [4].

Подход, базирующийся на диаграмме и принципе Парето, может быть применен для анализа используемых в процессе обучения программных моделей ЭВМ [5] и обоснования нецелесообразности применения на начальном этапе обучения программированию модели ЭВМ с избыточным количеством команд. Предпочтение следует отдавать ЭВМ, система команд которой содержит минимальное число машинных команд-инструкций.

С помощью анализа Парето количественно оценивалась частота использования машинных команд ЭВМ. Объектом исследования являлась система команд программной модели учебной вычислительной машины [6]. В качестве примера проанализированы три программы в мнемокодах, соответствующие трем алгоритмам: обрабатывающему элементы массива, использующему подпрограмму и разветвляющемуся. Установленная доля использованных команд в процессе решения задач подтверждает справедливость и применимость принципа „20/80“ — принципа Парето, который в наиболее общем виде можно сформулировать так: „двадцать процентов усилий дают восемьдесят процентов результата, остальные восемьдесят процентов обеспечивают лишь двадцать процентов результата“. Сделан вывод об избыточности системы команд ЭВМ, которая приводит к усложнению устройства управления ЭВМ [7].

Представленные результаты получены для ограниченной выборки, состоящей из 61 команды и относящейся к трем программам. Достоверность полученных результатов и выводов проверялась путем значительного увеличения числа команд, подлежащих статистической обработке. Для этого были проанализированы 50 программ в мнемокодах учебной ЭВМ [6, 8], реализующих разветвляющиеся алгоритмы (9 программ), обработку массивов данных — программирование циклов с переадресацией (8 программ), включающих подпрограмму и организацию стека (9 программ), программирование внешних устройств (10 программ) и реализующих различные способы адресации (14 программ).

Все использованные команды представлены в табл. 1, на основе которой строится диаграмма Парето. В первом столбце содержатся мнемокоды команд, а в скобках — соответствующие им машинные коды, представленные в десятичной системе счисления; во втором столбце — число повторений n конкретной команды (ее значимость); в третьем — накопленная сумма N числа повторений; в четвертом — доля r от суммарного числа повторений, выраженная в процентах; в пятом столбце — накопленная доля R, выраженная в процентах. Рассматриваемые параметры n, N, r и R являются метриками машинных команд ЭВМ.

Учебная ЭВМ включает 42 команды. В табл. 1 приведены 37 команд, которые расположены в порядке убывания частоты (значимости) их использования. Таким образом, 5 команд

* Распределение названо в честь итальянского экономиста и социолога Вильфредо Парето, который вывел эмпирическое правило, отражающее неравномерность распределения причин в природе.

в 50 исследуемых программах не использованы. Из таблицы следует, что восемь первых команд (примерно 20 % от общего количества) задействуются в процессе вычислений 850 раз, что составляет примерно 68 % от суммарного числа повторений. Применительно к статистике использования команд учебной ЭВМ принцип „20/80“ не соблюдается — этому случаю соответствует отношение „20/70“.

Изменение накопленной доли R графически отражается диаграммой Парето (рис. 1). Ось абсцисс содержит 37 равных интервалов — число использованных команд. Левая ось ординат соответствует накопленной доле R от числа повторений, выраженной в процентах, правая — накопленной сумме числа повторений команд N. Кумулятивная кривая Парето является по сути огибающей столбиковой диаграммы, построенной следующим образом.

Таблица 1

Команда (КОп)	N	n	$\approx R$, %	$\approx r$, %
RD (21)	283	283	22,532	**22,532**
WR (32)	152	435	12,102	**34,634**
WR (22)	124	559	9,873	**44,507**
SUB (24)	65	624	5,175	**49,682**
OUT (38)	63	687	5,016	**54,698**
ADD (33)	61	748	4,857	**59,555**
CALL (19)	54	802	4,299	**63,854**
RD (31)	48	850	3,822	**67,676**
JMP (10)	41	891	3,264	**70,940**
JS (13)	33	924	2,627	**73,567**
MUL (25)	31	955	2,468	**76,035**
HLT (09)	31	986	2,468	**78,503**
OUT (02)	31	1017	2,468	**80,971**
RET (08)	29	1046	2,309	**83,280**
IN (01)	29	1075	2,309	**85,589**
JNS (14)	26	1101	2,07	**87,659**
RDI (41)	25	1126	1,990	**89,649**
DIV (26)	23	1149	1,831	**91,480**
ADD (23)	19	1168	1,513	**92,993**
JNZ (12)	18	1186	1,433	**94,426**
PUSH (06)	10	1196	0,796	**95,222**
SUB (34)	9	1205	0,717	**95,939**
JRNZ (17)	8	1213	0,637	**96,576**
POP (07)	6	1219	0,478	**97,054**
JZ (11)	6	1225	0,478	**97,532**
IRET (03)	5	1230	0,398	**97,930**
EI (28)	5	1235	0,398	**98,328**
IN (37)	5	1240	0,398	**98,726**
MOV (30)	4	1244	0,318	**99,044**
MUL (35)	4	1248	0,318	**99,362**
DIV (36)	**2**	**1250**	**0,159**	**99,521**
ADI (43)	1	1251	0,08	**99,601**
SBI (44)	1	1252	0,08	**99,681**
MULI (45)	1	1253	0,08	**99,761**
DIVI (46)	1	1254	0,08	**99,841**
JO (15)	1	1255	0,08	**99,921**
JNO (16)	1	1256	0,08	**100**

Первый столбик соответствует команде RD(21) – „Чтение“, наиболее часто повторяемой (накопленная сумма числа повторений N = 283, накопленная доля от суммарного числа повторений R = 22,532 %). Второй столбик соответствует двум командам RD(21) и WR(32) — „Запись в регистр“, для которых N = 435, R = 34,634 %, третий — трем командам RD(21), WR(32) и WR(22) — „Запись в ячейку памяти“, для которых N = 559 и R = 44,50 7% и т.д.

Построение столбиковой диаграммы продолжается вплоть до 37-й команды JNO(16) — „Переход, если нет переполнения“. Кумулятивная кривая (см. рис. 1) математически соответствует функции распределения Парето, которая задается равенством:

$$F_X(x) = P(X < x) = 1 - (x_m/x)^k \quad \text{для} \quad x \geq x_m;\ x_m > 0;\ k > 0,$$

где X — случайная величина; x — значение случайной величины X; x_m и k — параметры распределения Парето.

Семь последних команд DIV(36), ADI(43), SBI(44), MULI(45), DIVI(46), JO(15) и JNO(16) могут быть объединены в соответствии с методикой построения диаграмм Парето в группу „Прочие“ [9], так как числовой результат повторений каждой из них меньше, чем самое малое значение n, полученное для остальных 30 команд.

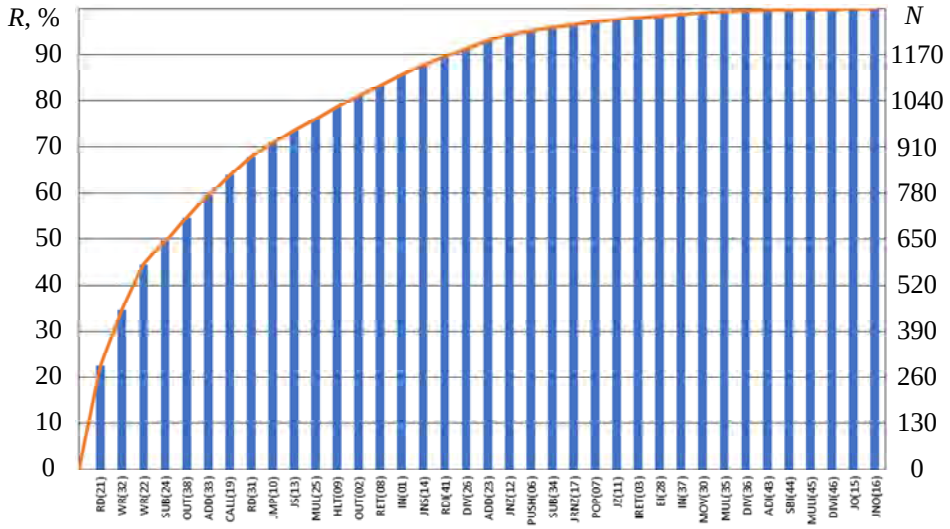


Рис. 1

На следующем этапе статистического оценивания применялся анализ Парето для микрокоманд, реализующих рассмотренные команды ЭВМ. В табл. 2 представлены все микрокоманды, используемые в микропрограммах, соответствующих всем командам и пустой операции NOP.

Таблица 2

Команда (КОп)	N	n	$\approx R$, %	$\approx r$, %
MRd	55	55	15,988	**15,988**
MAR := PC	47	102	13,663	**29,651**
PC := PC+1	47	149	13,663	**43,314**
CR := MDR	42	191	12,209	**55,523**
END_COMMAND	42	233	12,209	**67,732**
ALU <-- COP	12	245	3,488	**71,221**
Start ALU	12	257	3,488	**74,709**
RAR := CR5	9	266	2,616	**77,325**
DR := MDR	8	274	2,326	**79,651**
RRd	7	281	2,035	**81,686**
MAR := SP	6	287	1,744	**83,430**
MAR := ADR	6	293	1,744	**85,174**
MWr	4	297	1,163	**86,337**
DR := RDR	4	301	1,163	**87,500**
SP := SP+1	3	304	0,872	**88,372**
SP := SP-1	3	307	0,872	**89,244**
RWr	3	310	0,872	**90,116**
PC := MDR	2	312	0,581	**90,697**
PC := ADR	2	314	0,581	**91,278**
Acc := MDR	2	316	0,581	**91,859**

Продолжение Табл. 2

Команда (КОп)	*n*	*N*	≈ *R*, %	≈ *R*, %
OR := Acc	**1**	**317**	**0,291**	**92,150**
Fl := MDR[1:2]	**1**	**318**	**0,291**	**92,441**
INT_RETURN	**1**	**319**	**0,291**	**92,732**
RB := ADR	**1**	**320**	**0,291**	**93,023**
SP := ADR	**1**	**321**	**0,291**	**93,314**
MDR := RDR	**1**	**322**	**0,291**	**93,605**
RDR := MDR	**1**	**323**	**0,291**	**93,895**
HALT	**1**	**324**	**0,291**	**94,186**
JZ	**1**	**325**	**0,291**	**94,477**
JNZ	**1**	**326**	**0,291**	**94,767**
JS	**1**	**327**	**0,291**	**95,058**
JNS	**1**	**328**	**0,291**	**95,349**
JO	**1**	**329**	**0,291**	**95,640**
JNO	**1**	**330**	**0,291**	**95,931**
RAR := CR2	**1**	**331**	**0,291**	**96,222**
DEC_GR	**1**	**332**	**0,291**	**96,513**
JRNZ	**1**	**333**	**0,291**	**96,804**
MDR := 0.Fl.PC	**1**	**334**	**0,291**	**97,095**
INT (PC := IVT[adr])	**1**	**335**	**0,291**	**97,386**
MDR := PC	**1**	**336**	**0,291**	**97,677**
I := 1	**1**	**337**	**0,291**	**97,968**
I := 0	**1**	**338**	**0,291**	**98,259**
RAR := CR4	**1**	**339**	**0,291**	**98,545**
IORd	**1**	**340**	**0,291**	**98,836**
IOWr	**1**	**341**	**0,291**	**99,127**
MDR := Acc	**1**	**342**	**0,291**	**99,418**
Acc := RDR	**1**	**343**	**0,291**	**99,709**
RDR := Acc	**1**	**344**	**0,291**	**100**

Табл. 2 содержит 48 микрокоманд, расположенных в порядке убывания частоты их использования (значимости).

Диаграмма Парето, соответствующая табл. 2, приведена на рис. 2.

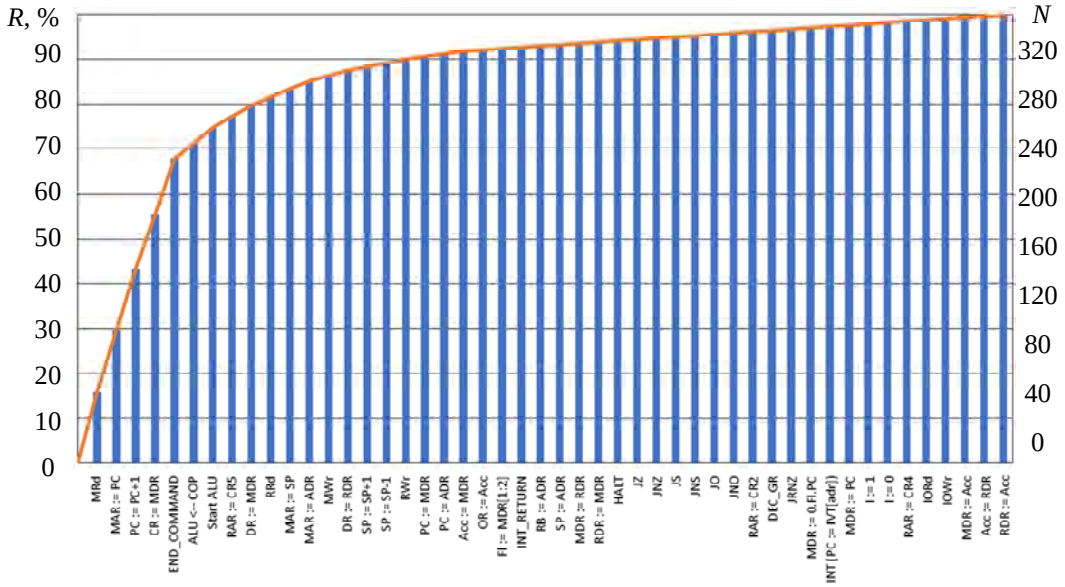


Рис. 2

Из табл. 2 и рис. 2 следует, что десять первых микрокоманд (примерно 21 % от общего количества) задействуются в процессе вычислений 281 раз, что составляет примерно 82 % от суммарного числа повторений. Установленная доля использованных микрокоманд в процессе

решения задач подтверждает применимость принципа Парето к микропрограммам, реализующим систему команд учебной ЭВМ. В группу „Прочие“ можно отнести 28 микрокоманд, каждая из которых используется в микропрограммах лишь один раз. Эта группа составляет примерно 58 % от общего числа микрокоманд, представленных в табл. 2.

Диаграмма Парето для микрокоманд, содержащая группу „Прочие“, представлена на рис. 3.

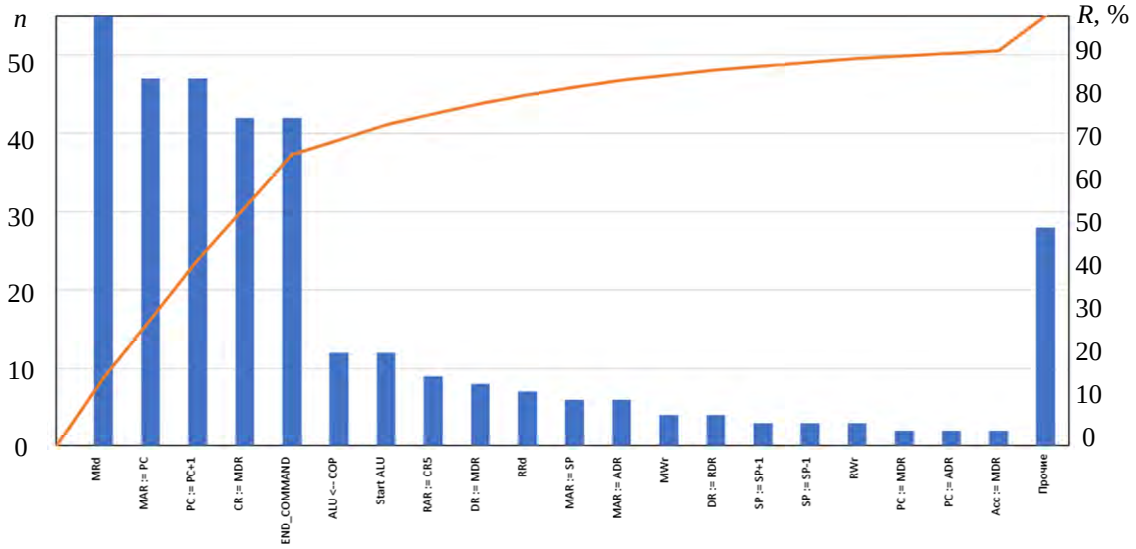


Рис. 3

Ось абсцисс диаграммы разбита на 21 одинаковый интервал. Убывающая столбиковая диаграмма начинается с микрокоманды MRd — „Чтение памяти“, 55 раз используемой в командах учебной ЭВМ. Последний 21-й интервал соответствует группе „Прочие“. Микрокоманды, образующие эту группу, добавляют примерно 8 % к накопленной доле R повторений.

Сказанное выше позволяет сделать следующие выводы. Редко используемые машинные инструкции и микрокоманды, их реализующие на уровне микропрограмм, приводят к усложнению архитектуры микропроцессоров. Принцип Парето применительно к работе процессора формулируется следующим образом: „в течение 80 % времени работы процессор выполняет 20 % от общего числа реализованных в нем команд“.

Целесообразно освободить процессор от выполнения 80 % редко используемых команд и микрокоманд, их реализующих. Сокращению подлежат команды и микрокоманды из группы „Прочие“. В табл. 1 и 2 соответствующие им строки выделены серым цветом. Этот выбор с последующим удалением может быть использован на этапе разработки RISC-компьютеров (компьютеров с сокращенным набором команд).

Уменьшение числа редко используемых машинных инструкций и микрокоманд приведет к упрощению устройств управления и архитектуры процессоров ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистические методы повышения качества / Пер. с англ.; под ред. *Х. Кумэ*. М.: Финансы и статистика, 1990. 304 с.

2. *Juran J. M.* Product quality-a prescription for West // Management Review. 1981. June. P. 9—10.

3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1973. С. 614—615.

4. *Аверьянов А. В., Белая Т. И., Молчанов О. Е.* Использование диаграммы Парето для обеспечения качества функционирования интегральных микросхем // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 7. С. 558—562.

5. *Аверьянов А. В., Белая Т. И., Молчанов О. Е.* Анализ программных моделей учебных ЭВМ с использованием принципа Парето // Естественные и технические науки. 2016. № 6. С. 160—164.

6. *Жмакин А. П.* Архитектура ЭВМ. СПб: БХВ-Петербург, 2010. 352 с.

7. *Аверьянов А. В., Калюжный А. В.* Применение анализа Парето для количественного оценивания частоты использования машинных команд ЭВМ // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 101—105.

8. *Басыров А. Г.* Организация ЭВМ и систем: практикум. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. 83 с.

9. *Аверьянов А. В., Горичев Ю. В., Осипов Н. А.* Надежность систем космических комплексов. Руководство к практическим и лабораторным занятиям / Под ред. *В. А. Белозёрова*. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. 92 с.

10. *Абель П.* Ассемблер. Язык и программирование для IBM PC. К.: Век$^{+}$, М.: ЭНТРОП, К.: НТИ, 2003. 736 с.

Сведения об авторах

Алексей Васильевич Аверьянов — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Игорь Николаевич Кошель — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; начальник факультета; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Вадим Викторович Кузнецов — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Ван Тиен Нгуен — курсант; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Поступила в редакцию 27.12.22; одобрена после рецензирования 12.01.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Kume H. *Statistical Methods for Quality Improvement*, Madras, 2006.
2. Juran J.M. *Management Review*, 1981, June, pp.9–10.
3. Korn G.A., Korn Th.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*, 1968.
4. Averyanov A.V., Belaya T.I., Molchanov O.E. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 7(59), pp. 558–562. (in Russ.)
5. Averyanov A.V., Belaya T.I., Molchanov O.E. *Natural and technical sciences*, 2016, no. 6, pp. 160–164. (in Russ.)
6. Zhmakin A.P. *Arkhitektura EVM Computer architecture*, St. Petersburg, 2010, 352 p. (in Russ.)
7. Averyanov A.V., Kalyuzhny A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 2(62), pp. 101–105. (in Russ.)
8. Basyrov A.G. *Organizatsiya EVM i sistem: praktikum* (Organization of Computers and Systems: Workshop), St. Petersburg, 2012, 83 p. (in Russ.)
9. Averyanov A.V., Gorichev Yu.V., Osipov N.A. *Nadezhnost' sistem kosmicheskikh kompleksov. Rukovodstvo k prakticheskim i laboratornym zanyatiyam* (Reliability of Systems of Space Complexes. Guide to Practical and Laboratory Classes), St. Petersburg, 2006, 92 p. (in Russ.)
10. Abel P. *IBM PC Assembly Language and Programming*, British Columbia Institute of Technology, 1998, 606 p.

Data on authors

Aleksey V. Averyanov — PhD, Associate Professor; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Igor N. Koshel — PhD, Associate Professor; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; Head of the Faculty; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Vadim V. Kuznetsov — PhD, Associate Professor; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Van Tien Nguyen — Student; A. F. Mozaisky Military Space Academy, Department of Information Systems and Networks; E-mail: vka_24kaf1@mail.ru

Received 27.12.22; approved after reviewing 12.01.22; accepted for publication 28.02.23.

УДК 681.51
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-266-275

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ КЛАССА НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ

А. А. Пыркин*, А. А. Бобцов, Х. Т. Нгуен

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

Аннотация. Рассматривается задача идентификации неизвестных параметров для класса нестационарных нелинейных систем. Предполагается, что нестационарные параметры могут быть представлены как выходы линейных генераторов с неизвестными матрицами состояния и начальными условиями. Предполагается, что переменные состояния системы доступны для измерения. На первом шаге разработанного алгоритма решается задача параметризации исходной динамической модели с получением линейной статической регрессионной модели. На втором шаге алгоритма оцениваются неизвестные постоянные параметры линейной регрессионной модели. Затем выполняется синтез наблюдателей для нестационарных параметров. Представленные результаты компьютерного моделирования демонстрируют работоспособность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: *нестационарные нелинейные системы, идентификация параметров, регрессионная модель*

Благодарности: работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № МД-3574.2022.4.

Ссылка для цитирования: *Пыркин А. А., Бобцов А. А., Нгуен Х. Т.* Алгоритм адаптивного оценивания параметров для класса нелинейных нестационарных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 266—275. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-266-275.

ALGORITHM OF ADAPTIVE ESTIMATION OF PARAMETERS FOR A CLASS OF NONLINEAR NON-STATIONARY SYSTEMS

A. A. Pyrkin*, A. A. Bobtsov, K. T. Nguen

ITMO University, St. Petersburg, Russia
**a.pyrkin@gmail.com*

Abstract. The problem of identification of unknown parameters for a class of non-stationary nonlinear systems is considered. It is assumed that non-stationary parameters can be represented as outputs of linear generators with unknown state matrices and initial conditions. The system state variables are supposed to be available for measurement. At the first step of the developed algorithm, the problem of parametrization of the initial dynamic model is solved to obtain a linear static regression model. At the second step of the algorithm, the unknown constant parameters of the linear regression model are estimated. Then the synthesis of observers for non-stationary parameters is performed. Presented results of computer simulation demonstrate the proposed algorithm efficiency.

Keywords: non-stationary nonlinear systems, identification of parameters, regression model

Acknowledments: the work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MD-3574.2022.4.

For citation: Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Nguen K. T. Algorithm of adaptive estimation of parameters for a class of nonlinear non-stationary systems. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 266—275 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-266-275.

Введение. Оценивание переменных параметров нелинейных нестационарных систем является актуальной задачей для широкого круга научно-технических и практических задач. Особенности оценивания параметров нестационарных систем и синтеза наблюдателей переменных состояния хорошо изучены в работах [1—11]. В статьях [1, 2] предложены не требующие идентификации параметров объекта управления методы управления нестационарными

© *Пыркин А. А., Бобцов А. А., Нгуен Х. Т., 2023*

системами на основе прямого адаптивного управления. Благодаря развитию методов непрямого адаптивного управления возможно для большого класса задач использовать именно идентификационные подходы к адаптивному управлению. Особенности применения непрямых походов к синтезу наблюдателей нестационарных систем рассматриваются в работах [3—9].

В [3] предложен алгоритм оценивания полиномиальных параметров нестационарных систем. Метод решения поставленной задачи основан на преобразовании математической модели управления к виду линейного регрессионного выражения.

В [4] представлен алгоритм оценивания неизвестных параметров линейных нестационарных объектов управления. Неизвестные параметры рассматриваются в виде линейной или кусочно-линейной функции времени. В результате параметризации линейного нестационарного объекта управления с использованием линейного фильтра получается линейная регрессионная модель.

В работах [6—9] предложены методы синтеза наблюдателей для нестационарных систем, основанные на методе GPEBO (обобщенный наблюдатель, основанный на оценке начальных условий) [12].

В настоящей работе рассмотрены более сложные допущения по неизвестным нестационарным параметрам в предположении, что параметры системы могут быть представлены линейными генераторами с неизвестными матрицей состояния и вектором начальных условий.

Постановка задачи. Рассмотрим класс нелинейных нестационарных систем вида

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \theta_1 f_1(x_1) + x_2 + b_1 u, \\ \dot{x}_2 &= \theta_2 f_2(x_2) + x_3 + b_2 u, \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= \theta_n f_n(x_n) + b_n u, \end{aligned} \tag{1}$$

$$y = x_1, \tag{2}$$

где $x_i \in \mathbb{R}^1$ — измеряемое состояние; $\theta_i \in \mathbb{R}^1$ — неизвестный нестационарный параметр; $b_i \in \mathbb{R}^1$ — неизвестный параметр; $u \in \mathbb{R}^1$ — известный входной сигнал; $y \in \mathbb{R}^1$ — измеряемая выходная переменная; $f_i(x_i)$ — известная нелинейная функция, $i = \overline{1,n}$.

Требуется синтезировать алгоритм оценивания неизвестных параметров $\hat{\theta}_i(t), \hat{b}_i(t)$, обеспечивающий выполнение условий

$$\lim_{t\to\infty}\left(\theta_i - \hat{\theta}_i(t)\right) = 0, \tag{3}$$

$$\lim_{t\to\infty}\left(b_i - \hat{b}_i(t)\right) = 0 \tag{4}$$

с учетом следующих допущений.

Допущение 1. Нестационарные параметры θ_i могут быть представлены в виде линейных генераторов

$$\theta_i = \mathbf{h}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\xi}_i, \tag{5}$$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_i = \boldsymbol{\Gamma}_i \boldsymbol{\xi}_i, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_i = \boldsymbol{\Gamma}_{0i} + \boldsymbol{\gamma}_i^{\mathrm{T}} \mathbf{h}_i, \ \boldsymbol{\Gamma}_{0i} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{h}_i^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

где $\boldsymbol{\xi}_i \in \mathbb{R}^l$ — вектор состояния генератора с неизвестным начальным значением $\boldsymbol{\xi}_i(0)$; $\boldsymbol{\Gamma}_i \in \mathbb{R}^{l\times l}$ — матрица неизвестных постоянных коэффициентов; $\mathbf{h}_i \in \mathbb{R}^l$ — вектор соответствующей размерности; $\boldsymbol{\gamma}_i \in \mathbb{R}^l$ — вектор неизвестных параметров.

Допущение 2. Функции $f_i(x_i)$ не равны нулю.

Параметризация модели объекта управления. Рассмотрим вспомогательную лемму [13], которая будет использована для параметризации нестационарных систем вида (1), (2) при получении линейной регрессионной модели.

Лемма. Для генератора (5)—(6) и линейного фильтра ($\frac{1}{p+\lambda}$, где $p=\frac{d}{dt}$ — дифференциальный оператор и параметр $\lambda>0$) справедливо соотношение

$$\frac{1}{p+\lambda}\xi_{i1}=\alpha_{i1}\xi_{i1}+\alpha_{i2}\xi_{i2}+\ldots+\alpha_{il}\xi_{il}, \tag{7}$$

$$\begin{cases}\theta_i=\xi_{i1},\\ \dot\xi_{i1}=\xi_{i2},\\ \vdots\\ \dot\xi_{il}=\gamma_{i1}\xi_{i1}+\gamma_{i2}\xi_{i2}+\ldots+\gamma_{il}\xi_{il},\end{cases} \tag{8}$$

где $\alpha_{im}\in\mathbb{R}$, $i=\overline{1,n}$, $m=\overline{1,l}$ — постоянные параметры.

Доказательство леммы. Применим оператор $(p+\lambda)$ к выражению (7)

$$(p+\lambda)\frac{1}{p+\lambda}\xi_{i1}=(p+\lambda)\left(\alpha_{i1}\xi_{i1}+\alpha_{i2}\xi_{i2}+\ldots+\alpha_{il}\xi_{il}\right),\ i=\overline{1,n}. \tag{9}$$

Преобразовав уравнение (9), найдем

$$\begin{gathered}\xi_{i1}=\left(\alpha_{i1}\dot\xi_{i1}+\alpha_{i2}\dot\xi_{i2}+\ldots+\alpha_{il}\dot\xi_{il}\right)+\lambda\left(\alpha_{i1}\xi_{i1}+\alpha_{i2}\xi_{i2}+\ldots+\alpha_{il}\xi_{il}\right),\\ \xi_{i1}=\alpha_{i1}\xi_{i2}+\alpha_{i2}\xi_{i3}+\ldots+\alpha_{i(l-1)}\xi_{il}+\alpha_{il}\left(\gamma_{i1}\xi_{i1}+\gamma_{i2}\xi_{i2}+\ldots+\gamma_{il}\xi_{il}\right)+\\ +\lambda\left(\alpha_{i1}\xi_{i1}+\alpha_{i2}\xi_{i2}+\ldots+\alpha_{il}\xi_{il}\right).\end{gathered} \tag{10}$$

С учетом уравнения (10) получим следующие соотношения:

$$\begin{cases}\lambda\alpha_{i1}+\alpha_{il}\gamma_{il}=1,\\ \lambda\alpha_{i2}+\alpha_{il}\gamma_{i2}+\alpha_{i1}=0,\\ \vdots\\ \lambda\alpha_{ik}+\alpha_{il}\gamma_{l}+\alpha_{i(k-1)}=0,\end{cases} \tag{11}$$

где $k=\overline{2,l}$.

Перепишем (11) в матричном виде

$$\begin{bmatrix}\lambda&0&0&\cdots&0&0&\gamma_{i1}\\ 1&\lambda&0&\cdots&0&0&\gamma_{i2}\\ 0&1&\lambda&\cdots&0&0&\gamma_{i3}\\ \vdots&\vdots&\vdots&\ddots&\vdots&\vdots&\vdots\\ 0&0&0&\cdots&1&\lambda&\gamma_{i(l-1)}\\ 0&0&0&\cdots&0&1&\lambda+\gamma_{il}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha_{i1}\\ \alpha_{i2}\\ \alpha_{i3}\\ \vdots\\ \alpha_{i(l-1)}\\ \alpha_{il}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\\0\\0\\ \vdots\\0\\0\end{bmatrix}. \tag{12}$$

Из модели (12) можем найти α_k, $k=\overline{1,l}$ следующим образом:

$$\begin{bmatrix}\alpha_{i1}\\ \vdots\\ \alpha_{il}\end{bmatrix}=\left(\lambda\mathbf{I}-\begin{bmatrix}0&0\\ \mathbf{I}&0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \vdots\\1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\gamma_{i1}\\ \vdots\\ \gamma_{il}\end{bmatrix}\right)^{-1}\begin{bmatrix}1\\ \vdots\\0\end{bmatrix}, \tag{13}$$

что и требовалось доказать.

Следствие. Если параметры α_{ik} известны, то можем найти γ_k как

$$\gamma_{i1} = \frac{1-\lambda\alpha_{i1}}{\alpha_{il}},\ \ \gamma_{ik} = \frac{-\alpha_{i(k-1)} - \lambda\alpha_{ik}}{\alpha_{il}},\ \ k = \overline{2,l},\ \ i = \overline{1,n}. \tag{14}$$

Далее, разделив каждое уравнение (1) на $f_i(x_i),\ i = \overline{1,n}$, получим

$$\frac{\dot{x}_i}{f(x_i)} = \theta_i + \frac{x_i}{f_i(x_i)} + b_i \frac{u}{f_i(x_i)} \tag{15}$$

или

$$\theta_i = \frac{\dot{x}_i}{f(x_i)} - \frac{x_i}{f_i(x_i)} - b_i \frac{u}{f_i(x_i)}. \tag{16}$$

Применим линейный фильтр $\frac{1}{p+\lambda}$ к выражению (16)

$$\frac{1}{p+\lambda}\theta_i = \frac{1}{p+\lambda}\xi_{i1} = \frac{p}{p+\lambda}Z_{i1} - \frac{1}{p+\lambda}Z_{i2} - b_i Z_{i3}, \tag{17}$$

где $Z_{i1} = \int \frac{dx_i}{f(x_i)},\ Z_{i2} = \frac{x_i}{f(x_i)},\ Z_{i3} = \frac{u}{f(x_i)},\ i = \overline{1,n},.$

Заметим, что

$$\begin{cases} \xi_{i2} = \xi_{i1}^{(1)}, \\ \xi_{i3} = \xi_{i2}^{(1)} = \xi_{i1}^{(2)}, \\ \vdots \\ \xi_{il} = \xi_{i(l-1)}^{(1)} = \xi_{i1}^{(l-1)} \end{cases} \quad i = \overline{1,n},$$

и перепишем выражение (7) в следующем виде:

$$\frac{1}{p+\lambda}\xi_{i1} = \alpha_{i1}\xi_{i1} + \alpha_{i2}\xi_{i1}^{(1)} + \alpha_{i3}\xi_{i1}^{(2)} + \ldots + \alpha_{il}\xi_{i1}^{(l-1)}, \tag{18}$$

здесь индекс в скобках означает порядок производной.

Применим линейный фильтр $\frac{1}{(p+\lambda)^l}$ к (18) и получим

$$\frac{1}{(p+\lambda)^l}\left(\frac{1}{p+\lambda}\xi_{i1}\right) = \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}}\alpha_{i1}\left(\frac{1}{p+\lambda}\xi_{i1}\right) + \ldots + \frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}}\alpha_{il}p^{l-1}\left(\frac{1}{p+\lambda}\xi_{i1}\right). \tag{19}$$

С использованием (17) перепишем (19) в следующем виде:

$$\frac{1}{(p+\lambda)^l}\left(\frac{p}{p+\lambda}Z_{i1} - \frac{1}{p+\lambda}Z_{i2} - b_i\frac{1}{p+\lambda}Z_{i3}\right) =$$

$$= \alpha_{i1}\frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}}\left(\frac{p}{p+\lambda}Z_{i1} - \frac{1}{p+\lambda}Z_{i2} - b_i\frac{1}{p+\lambda}Z_{i3}\right) + \ldots +$$

$$+\alpha_{il}\frac{p^{l-1}}{(p+\lambda)^{l-1}}\left(\frac{p}{p+\lambda}Z_{i1} - \frac{1}{p+\lambda}Z_{i2} - b_i\frac{1}{p+\lambda}Z_{i3}\right). \tag{20}$$

С учетом уравнения (20) имеем

$$\frac{1}{(p+\lambda)^l}\left(\frac{p}{p+\lambda}Z_{i1}-\frac{1}{p+\lambda}Z_{i2}\right)=$$

$$=\alpha_{i1}\frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}}\left(\frac{p}{p+\lambda}Z_{i1}-\frac{1}{p+\lambda}Z_{i2}\right)+\ldots+$$

$$+\alpha_{il}\frac{p^{l-1}}{(p+\lambda)^{l-1}}\left(\frac{p}{p+\lambda}Z_{i1}-\frac{1}{p+\lambda}Z_{i2}\right)+$$

$$+b_i\frac{1}{(p+\lambda)^l}\frac{1}{p+\lambda}Z_{i3}-b_i\alpha_{i1}\frac{1}{(p+\lambda)^{l-1}}\frac{1}{p+\lambda}Z_{i3}-\ldots-b_i\alpha_{il}\frac{p^{l-1}}{(p+\lambda)^{l-1}}\frac{1}{p+\lambda}Z_{i3}. \qquad (21)$$

Далее на основе уравнения (21) построим регрессионные модели

$$\Xi_i(t)=\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Theta}_i, \qquad (22)$$

где

$\Xi_i=\dfrac{1}{(p+\lambda)^l}\left(\dfrac{p}{p+\lambda}Z_{i1}-\dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i2}\right)\in\mathbb{R}^{1\times n}$ — известная функция;

$\boldsymbol{\chi}_i^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\beta_{i1} & \ldots & \beta_{il} & \beta_{i(l+1)} & \beta_{i(l+2)} & \ldots & \beta_{i(2l+1)}\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{(2l+1)\times n}$ — регрессор

$\beta_{i1}=\dfrac{1}{(p+\lambda)^{l-1}}\left(\dfrac{p}{p+\lambda}Z_{i1}-\dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i2}\right)$, $\beta_{il}=\dfrac{p^{l-1}}{(p+\lambda)^{l-1}}\left(\dfrac{p}{p+\lambda}Z_{i1}-\dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i2}\right)$,

$\beta_{i(l+1)}=\dfrac{1}{(p+\lambda)^l}\dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i3}$, $\beta_{i(l+2)}=-\dfrac{1}{(p+\lambda)^{l-1}}\dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i3}$, $\beta_{i(2l+1)}=-\dfrac{p^{l-1}}{(p+\lambda)^{l-1}}\dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i3}$ — элементы регрессора;

$\boldsymbol{\Theta}=\begin{bmatrix}\alpha_{i1} & \ldots & \alpha_{il} & b_i & b_i\alpha_{i1} & \ldots & b_i\alpha_{il}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^{(2l+1)\times n}$ — вектор неизвестных параметров, $i=\overline{1,n}$.

Далее с учетом следствия леммы (14) оценим параметры регрессионных моделей (22), используя метод динамического расширения регрессора и смешивания (DREM) [14] или его модификации [15], с помощью которых можно определить параметры $\boldsymbol{\Gamma}$ из (6).

Синтез наблюдателей нестационарных параметров. На основе оценки неизвестных параметров матрицы $\hat{\boldsymbol{\Gamma}}_i$ и параметров $\hat{b}_i$ выполним второй шаг алгоритма оценивания параметров вектора $\xi_i(0)$ модели (5), (6) методом GPEBO [12].

Рассмотрим вспомогательную систему вида

$$\hat{\theta}_i=\mathbf{h}_i^{\mathrm{T}}\xi_{\theta i}, \qquad (23)$$

$$\dot{\xi}_{\theta i}=\boldsymbol{\Gamma}_i\xi_{\theta i}. \qquad (24)$$

Рассмотрим ошибку

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i=\xi_{\theta i}-\xi_i \qquad (25)$$

и ее производную с учетом уравнений (6) и (24)

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i=\boldsymbol{\Gamma}_i\boldsymbol{\varepsilon}_i. \qquad (26)$$

Для решения дифференциального уравнения (26) найдем

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = e^{\boldsymbol{\Gamma}_i t}\boldsymbol{\varepsilon}_i(0) = \boldsymbol{\Phi}_i\boldsymbol{\varepsilon}_i(0) = \boldsymbol{\Phi}_i\boldsymbol{\eta}_i, \tag{27}$$

где $\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i$ — фундаментальная матрица, для которой $\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i = \boldsymbol{\Gamma}_i\boldsymbol{\Phi}_i$ $\boldsymbol{\Phi}_i(0) = \mathbf{I}_{l\times l}$; $\boldsymbol{\eta}_i^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix}\eta_{i1} & \dots & \eta_{il}\end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{l\times n}$, $i = \overline{1,n}$, — искомый вектор неизвестных параметров.

Если в начальный момент времени состояние (24) равно нулю, то $\boldsymbol{\eta}_i$ является вектором начальных условий системы (5)—(6):

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i(0) = -\boldsymbol{\xi}_i(0). \tag{28}$$

Задача оценивания векторов $\boldsymbol{\xi}_i(0)$ может быть сведена к идентификации векторов неизвестных параметров $\boldsymbol{\eta}_i$, при этом $\hat{\theta}_i$ может быть представлена в следующем виде:

$$\hat{\theta}_i = \mathbf{h}_i^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\Phi}}_i\boldsymbol{\eta}_i. \tag{29}$$

Подставив (29) в уравнение (17), получим регрессионное уравнение

$$q_i(t) = \mathbf{M}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\eta}_i, \tag{30}$$

где $q_i(t) = \dfrac{p}{p+\lambda}Z_{i1} - \dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i2} - b_i\dfrac{1}{p+\lambda}Z_{i3}$ — известные функции;

$\mathbf{M}_i^{\mathrm{T}} = \left[\dfrac{1}{p+\lambda}\boldsymbol{\Phi}_{i11} \quad \cdots \quad \dfrac{1}{p+\lambda}\boldsymbol{\Phi}_{i1l}\right] \in \mathbb{R}^{l\times n}$ — регрессор;

$\boldsymbol{\eta}_i^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix}\eta_{i1} & \dots & \eta_{il}\end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{l\times n}, i = \overline{1,n}$ — вектор неизвестных параметров.

Для оценивания параметров регрессионных моделей (30) используются метод динамического расширения регрессора и смешивания [14] или его модификации [15]. В результате получим l независимых линейных регрессионных моделей первого порядка, неизвестными параметрами которых являются компоненты постоянного вектора неизвестных параметров исходной регрессионной модели.

Математическое моделирование. Результаты моделирования иллюстрируют эффективность предложенного алгоритма оценивания неизвестных параметров нестационарных систем. Моделирование выполнено с использованием программной среды MATLAB/Simulink при следующих параметрах системы (1)—(2):

$$n = 2;\ \boldsymbol{\Gamma}_1 = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{bmatrix}, \boldsymbol{\xi}_1(0) = \begin{bmatrix}3\\2\end{bmatrix}, b_1 = 3,\ f(x_1) = 3+\sin(x_1), u = -(3+\sin(t))x,$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_2 = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -4 & 0\end{bmatrix}, \boldsymbol{\xi}_2(0) = \begin{bmatrix}2\\1\end{bmatrix}, b_2 = 2,\ f(x_2) = 2+\sin(x_2).$$

На рис. 1 приведены переходные процессы оценки неизвестных параметров $\hat{\alpha}_{11}(t)$, $\hat{\alpha}_{12}(t)$ при $\alpha_{11} = 0,5, \alpha_{12} = -0,5$; на рис. 2 показаны переходные процессы неизвестных параметров $\hat{\gamma}_{11}(t)$, $\hat{\gamma}_{12}(t)$ при $\gamma_{11} = -1, \gamma_{12} = 0$; на рис. 3 представлен результат оценивания параметра $\hat{b}_1(t)$ при $b_1 = 3$; на рис. 4 приведены оценки неизвестных параметров вектора на-

чальных условий $\hat{\xi}_1(0)$, при $\xi_1(0)=\begin{bmatrix}3\\2\end{bmatrix}$; на рис. 5 показаны результаты моделирования $\theta_1(t)$ и $\hat{\theta}_1(t)$; на рис. 6 представлен график ошибок $\tilde{\theta}_1=\theta_1(t)-\hat{\theta}_1(t)$.

На рис. 7 приведены оценки неизвестных параметров $\hat{\alpha}_{21}(t)$, $\hat{\alpha}_{22}(t)$ при $\alpha_{21}=0,2$, $\alpha_{22}=-0,2$, на рис. 8 показаны переходные характеристики неизвестных параметров $\hat{\gamma}_{21}(t)$, $\hat{\gamma}_{22}(t)$ при $\gamma_{21}=-4$, $\gamma_{22}=0$, на рис. 9 представлен результат оценивания параметра $\hat{b}_2(t)$ при $b_2=2$, на рис. 10 приведены переходные процессы оценки неизвестных параметров вектора начальных условий $\hat{\xi}_2(0)$, при $\xi_2(0)=\begin{bmatrix}2\\1\end{bmatrix}$, на рис. 11 приведены результаты моделирования $\theta_2(t)$ и $\hat{\theta}_2(t)$; на рис. 12 — график ошибок $\tilde{\theta}_2(t)=\theta_2(t)-\hat{\theta}_2(t)$.

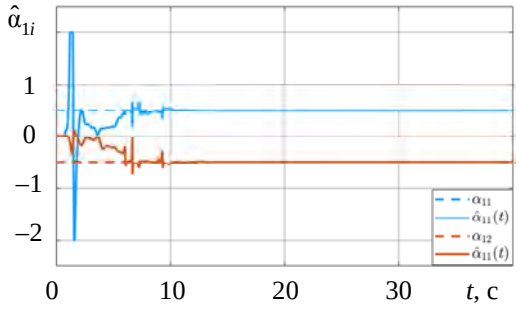


Рис. 1

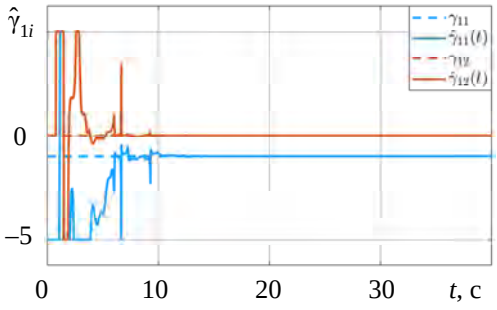


Рис. 2

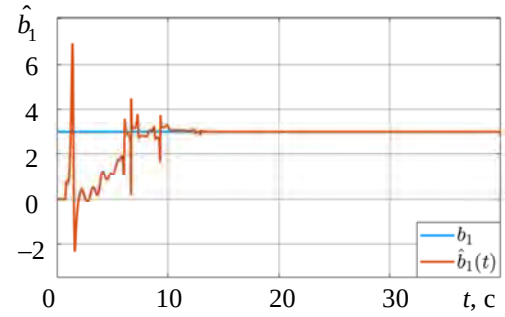


Рис. 3

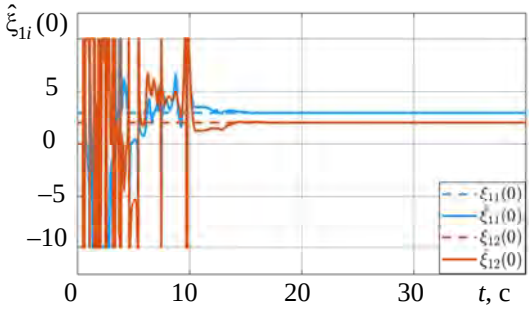


Рис. 4

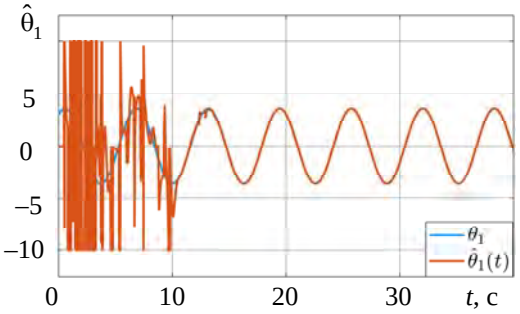


Рис. 5

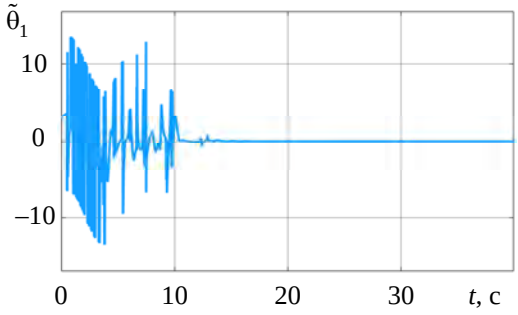


Рис. 6

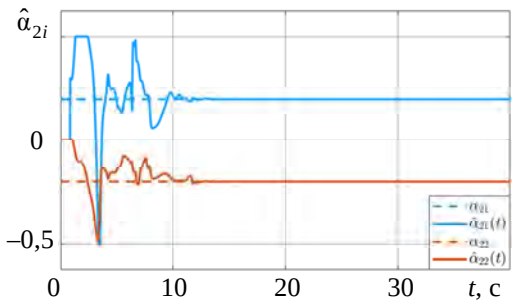


Рис. 7

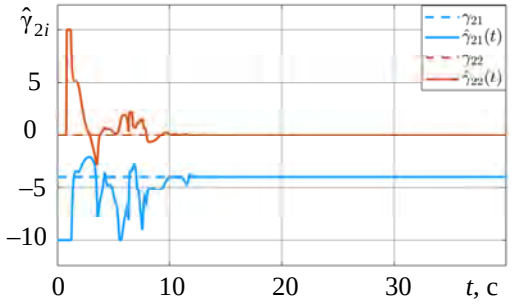


Рис. 8

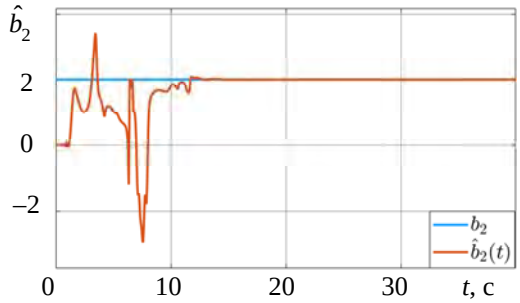


Рис. 9

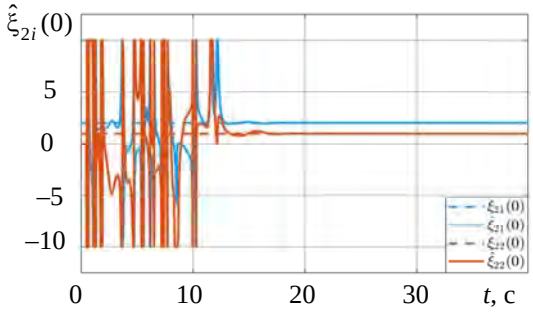


Рис. 10

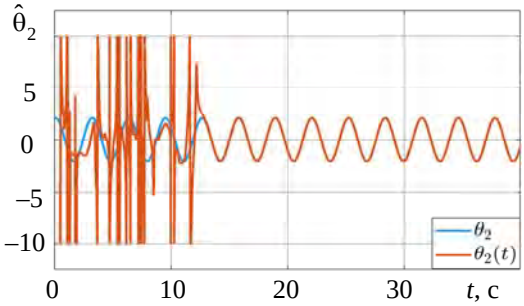


Рис. 11

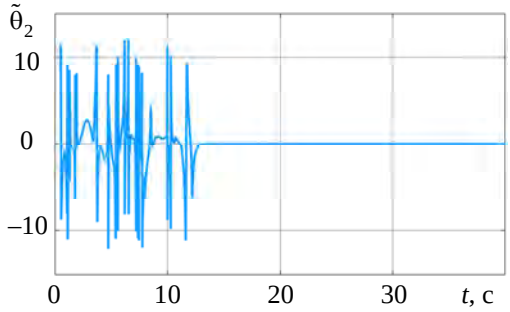


Рис. 12

На рис. 1—12 приведены результаты моделирования предложенного в работе алгоритма оценивания параметров нелинейных нестационарных систем. Как видно из графиков, алгоритм обеспечивает сходимость к истинным значениям оценивания для всех неизвестных параметров системы.

Заключение. В работе предложен алгоритм идентификации неизвестных параметров нелинейных нестационарных систем. Решение поставленной задачи основано на преобразовании динамической модели управления к виду линейной регрессионной. Выполнена оценка неизвестных параметров регрессионных моделей с использованием метода динамического расширения регрессора. Результаты моделирования иллюстрируют сходимость оценивания параметров к истинным значениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобцов А. А., Наговицина А. Г.* Адаптивное управление по выходу линейными нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. 2006. № 12. С. 163—174.

2. *Бобцов А. А., Григорьев В. В., Наговицина А. Г.* Алгоритм адаптивного управления нестационарным объектом в условиях возмущения и запаздывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 8—14.

3. *Данг Б., Пыркин А. А., Бобцов А. А., Ведяков А. А.* Идентификация полиномиальных параметров нестационарных линейных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 6. С. 459—468.

4. *Ле В. Т., Коротина М. М., Бобцов А. А., Арановский С. В., Во К. Д.* Идентификация линейно изменяющихся во времени параметров нестационарных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 5. С. 259—265.

5. *Ван Ц., Ле В. Т., Пыркин А. А., Колюбин С. А., Бобцов А. А.* Идентификация кусочно-линейных параметров регрессионных моделей нестационарных детерминированных систем // Автоматика и телемеханика. 2018. № 12. С. 71—82.

6. *Данг Б., Пыркин А. А., Бобцов А. А., Ведяков А. А.* Синтез адаптивного наблюдателя для нестационарных нелинейных систем с неизвестными полиномиальными параметрами // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3(133). С. 374—379.

7. *Бобцов А. А., Николаев Н. А., Ортега Мартинес Р., Слита О. В., Козачёк О. А.* Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейной нестационарной системы с частично неизвестными параметрами матрицы состояния и вектора входа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 6. С. 283—288.

8. *Бобцов А. А., Лямин А. В., Сергеев К. А.* Синтез закона адаптивного управления для стабилизации не точно заданных нестационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. № 3. С. 3—7.

9. *Во Куок Д., Бобцов А. А.* Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейных нестационарных систем с параметрами, заданными не точно // Автоматика и телемеханика. 2020. № 12. С. 100—110.

10. *Цыкунов А. М.* Робастное управление нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. 1996. № 2. С. 117—125.

11. *Клейман Е. Г., Мочалов И. А.* Идентификация нестационарных объектов // Автоматика и телемеханика. 1994. 1994, № 2. С. 3—22.

12. *Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D.* Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical–biological reactors // Automatica. 2021. Vol. 129. P. 109635.

13. *Мирошник И. В., Никифоров В. О.* Синтез линейных систем автоматического управления. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 76 с.

14. *Aranovskiy S., Bobsov A., Ortega R., Pyrkin A.* Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62, N 7. P. 3546—3550.

15. *Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Isidori A.* An adaptive observer for uncertain linear time-varying systems with unknown additive perturbations // Automatica. 2023. Vol. 147. P. 110677.

Сведения об авторах

Антон Александрович Пыркин — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; профессор; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

Алексей Алексеевич Бобцов — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; профессор; E-mail: bobstov@mail.ru

Нгуен Хак Тунг — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com

Поступила в редакцию 23.12.22; одобрена после рецензирования 28.12.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Bobtsov A.A., Nagovitsina A.G. *Automation and Remote Control*, 2006, no. 12(67), pp. 2010–2020.
2. Bobtsov A.A., Grigoriev V.V., Nagovitsina A.G. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2007, no. 1, pp. 8–14. (in Russ.)
3. Dung Kh.B., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Vedyakov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 6(64), pp. 459–468. (in Russ.)
4. Le V.T., Korotina M.M., Bobtsov A.A., Aranovskiy S.V., Vo Q.D. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, no. 5(20), pp. 259–265. (in Russ.)
5. Wang J., Le Vang T., Pyrkin A.A., Kolyubin S.A., Bobtsov A.A. *Automation and Remote Control*, 2018, no. 12, pp. 2159–2168.
6. Dung Kh.B., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Vedyakov A.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, no. 3(21), pp. 374–379. (in Russ.)
7. Bobtsov A.A., Nikolaev N.A., Ortega Martinez R., Slita O.V., Kozachok O.A. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, no. 6(23), pp. 283–288. (in Russ.)
8. Bobtsov A.A., Lyamin A.V., Sergeev K.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2001, no. 4, pp. 3–7. (in Russ.)
9. Quoc D.V., Bobtsov A.A. *Automation and Remote Control*, 2020, no. 12(81), pp. 2220–2229.

10. Tsykunov A.M. *Automation and Remote Control*, 1996, no. 2, pp. 117–125. (in Russ.)
11. Kleiman E.G., Mochalov I.A. *Automation and Remote Control*, 1994, no. 2(55), pp. 149–163.
12. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. *Automatica*, 2021, vol. 129, pp. 109635.
13. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O. *Sintez lineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Synthesis of Linear Automatic Control Systems), St. Petersburg, 2000, 76 p. (in Russ.)
14. Aranovskiy S., Bobsov A., Ortega R., Pyrkin A. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, no. 7(62), pp. 3546–3550.
15. Pyrkin A., Bobtsov A., Ortega R., Isidori A. *Automatica*, 2023, vol. 147, pp. 110677.

Data on authors

Anton A. Pyrkin	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
Alexey A. Bobtsov	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: bobstov@mail.ru
Nguyen Khac Tung	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com

Received 23.12.22; approved after reviewing 28.12.22; accepted for publication 28.02.23.

УДК 681.511.4; УДК 629.7.05
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

М. А. Ватутин[1*], А. И. Ключников[2]

[1] *Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*
[*] *vatutinm@inbox.ru*
[2] *1-й Государственный испытательный космодром, г. Мирный, Архангельская обл., Россия*

Аннотация. Рассмотрены маятниковый акселерометр компенсационного типа как электромеханическое измерительное устройство и факторы, влияющие на его точностные параметры. Показано, что ошибки обратного преобразователя, компенсирующего входное воздействие, не снижаются элементами цепи обратной связи. Разработана математическая модель ошибки компенсационного акселерометра в статическом режиме работы. Оценено влияние конструктивных и электронно-преобразовательных элементов акселерометра на общую погрешность измерения. Показано, что одним из основных источников погрешности преобразования измеряемого ускорения в электрический сигнал является устройство, суммирующее измеряемую величину и величину компенсирующего воздействия. Ошибка сравнения этих двух сигналов суммирующим устройством и определяет ошибку измерения входного ускорения акселерометром.

Ключевые слова: *акселерометр, ошибка сравнения, компенсационный метод измерения, точностные параметры, радиоэлементы, источник опорного напряжения*

Ссылка для цитирования: *Ватутин М. А., Ключников А. И.* Математическая модель погрешности компенсационного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 276—284. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284.

MATHEMATICAL MODEL OF THE ERROR OF THE COMPENSATION ACCELEROMETER

M. A. Vatutin[1*], A. I. Klyuchnikov[2]

[1] *A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia*
[*] *vatutinm@inbox.ru*
[2] *1st State Test Cosmodrome, Mirny, Arkhangelsk region, Russia*

Abstract. A compensation-type pendulum accelerometer is considered as an electromechanical measuring device, and factors affecting its accuracy characteristics are analyzed. It is shown that the errors of the inverse converter compensating the input action are not reduced by the elements of the feedback circuit. A mathematical model of the error of the compensation accelerometer in the static mode of operation is developed. The influence of the design and electronic-converter elements of the accelerometer on the overall measurement error is estimated. It is shown that one of the main sources of error in converting the measured acceleration into an electrical signal is a device summing the measured value and the value of the compensating effect. The error of comparing these two signals by the summing device determines the error of measuring the input acceleration by the accelerometer.

Keywords: accelerometer, comparison error, compensation measurement method, accuracy parameters of radio elements, accuracy parameters of the accelerometer, reference voltage source

For citation: Vatutin M. A., Klyuchnikov A. I. Mathematical model of the error of the compensation accelerometer. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 276—284 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284.

Введение. Повышение точности и достоверности определения значений физических величин представляет собой одну из важных задач совершенствования измерительных устройств [1]. Решение этой задачи во многом определяет степень надежности и безопасности

© *Ватутин М. А., Ключников А. И., 2023*

функционирования сложных технических объектов. В большом количестве различных измерительных устройств используется компенсационный метод измерения [2, 3]. Достижение низкой погрешности измерения физической величины в классическом датчике обеспечивается высокоточными элементами, как механическими, так и электронными [4—7]. В то же время формирование окончательных точностных параметров измерительного устройства не от всех элементов одинаково зависит. Важную роль в компенсационных устройствах измерения играет аналоговое суммирующее устройство, в котором суммируются (сравниваются) измеряемый сигнал и компенсирующий сигнал обратной связи [8, 9].

Цель настоящей статьи — оценить влияние конструктивных и электронно-преобразовательных элементов акселерометра на общую погрешность измерения.

Влияние элементов маятникового акселерометра на погрешность измерения. Одним из измерительных устройств, использующих компенсационный метод измерения, является маятниковый акселерометр (МА).

Структурно-динамическая схема маятникового акселерометра, функционирующего в линейном режиме, приведена на рис. 1, здесь: $a_{вх}$ — измеряемое входное ускорение; m — масса чувствительного элемента (ЧЭ); l — длина ЧЭ с торсионом; $M_и$ — момент инерции; $M_{ОС}$ — момент обратной связи; ΔM — разность моментов $M_и$ и $M_{ОС}$; СмУ — суммирующее устройство; W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 — передаточная функция соответственно ЧЭ, фотодатчика угла (ФДУ), усилителя-преобразователя (УП), преобразователя „напряжение—ток“ (ПНТ), датчика момента (ДМ); α — угол отклонения ЧЭ; $i_{ФДУ}$ — ток на выходе фотодатчика угла; $u_{УП}$ — напряжение на выходе усилителя-преобразователя; $i_{ОС}$ — ток обратной связи.

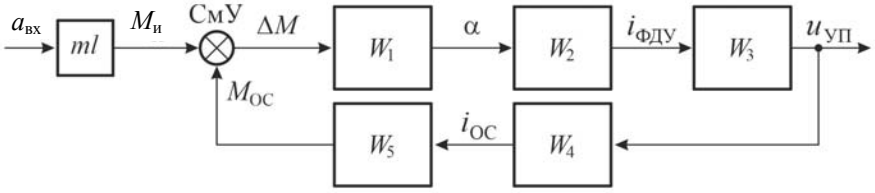


Рис. 1

Чувствительным элементом МА выступает подвижная масса маятника, согласно [3], его передаточная функция определяется выражением

$$W_1(p) = \frac{k_{ЧЭ}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}, \qquad (1)$$

где $k_{ЧЭ} = 1/C$ — коэффициент передачи подвижной части ЧЭ; $T_1 = \sqrt{J/C}$ — постоянная времени подвижной части ЧЭ; $\xi = \mu/2\sqrt{JC}$ — коэффициент затухания; C — коэффициент жесткости торсионного подвеса; J — момент инерции; μ — коэффициент демпфирования; p — оператор Лапласа.

Передаточные функции ФДУ, УП, ПНТ и ДМ, изображенные на рис. 1, соответственно имеют вид

$$W_2(p) = \frac{k_{ФДУ}}{T_{ФДУ} p + 1},\ W_3(p) = \frac{k_{УП}}{T_{УП} p + 1},\ W_4(p) = \frac{k_{ПНТ}}{T_{ПНТ} p + 1},\ W_5(p) = \frac{k_{ДМ}}{T_{ДМ} p + 1}, \qquad (2)$$

где $k_{ФДУ}$, $k_{УП}$, $k_{ПНТ}$, $k_{ДМ}$ — коэффициент передачи фотодатчика угла, усилителя-преобразователя, преобразователя „напряжение—ток“, датчика момента; $T_{ФДУ}$, $T_{УП}$, $T_{ПНТ}$, $T_{ДМ}$ — постоянные времени.

Значение каждого из параметров $T_{ФДУ}$, $T_{УП}$, $T_{ПНТ}$ и $T_{ДМ}$ много меньше постоянной времени $T_{ЧЭ}$. Поэтому в первом приближении фотодатчик угла, усилитель-преобразователь, преобразователь „напряжение—ток“ и датчик момента можно считать безынерционными

$$W_2(p) = k_{\text{ФДУ}},\ W_3(p) = k_{\text{УП}},\ W_4(p) = k_{\text{ПНТ}},\ W_5(p) = k_{\text{ДМ}}. \quad (3)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы будет

$$W_1(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}, \quad (4)$$

где $k = k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{ФДУ}} k_{\text{УП}}$ — коэффициент передачи прямой цепи преобразования. Передаточная функция цепи обратной связи имеет вид

$$W_{\text{ОС}}(p) = W_4(p) \cdot W_5(p) = \frac{k_{\text{ПНТ}}}{T_{\text{ПНТ}} p + 1} \cdot \frac{k_{\text{ДМ}}}{T_{\text{ДМ}} p + 1} \quad (5)$$

и в первом приближении

$$W_{\text{ОС}}(p) = k_{\text{ПНТ}} \cdot k_{\text{ДМ}}. \quad (6)$$

Если в качестве входного (задающего) воздействия рассматривать $M_{\text{и}}$, а в качестве выходной (управляющей) величины — $M_{\text{ОС}}$, то передаточная функция замкнутой системы будет соответствовать следующему выражению:

$$\Phi(p) = \frac{M_{\text{ОС}}}{M_{\text{и}}} = \frac{W_1^*(p)}{1 + W_1^*(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)}, \quad (7)$$

где $W_1^*(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$.

Рассмотренные выше соотношения справедливы, когда элементы конструкции МА (см. рис. 1) обладают идеальными параметрами и в них отсутствуют погрешности преобразования сигнала — паразитные смещения, дрейфы и другие изменения параметров элементов, вызванные воздействием различных дестабилизирующих факторов. В реальных элементах конструкции МА указанные погрешности присутствуют как собственная нестабильность параметров. Снизить влияние погрешности каждого из элементов акселерометра на общую погрешность можно, охватив его отрицательной обратной связью, что с успехом и применяется в компенсационных маятниковых акселерометрах.

В работе [10] показано влияние параметров элементов прямой цепи преобразования $W_1^*(p)$ компенсационного маятникового акселерометра и цепи его обратной связи $W_{\text{ОС}}(p)$ на стабильность передаточной функции

$$\delta_{\Phi(p)} = \frac{1}{\left(1 + W_1^*(p) W_{\text{ОС}}(p)\right)} \delta_{W_1^*(p)} - \delta_{W_{\text{ОС}}(p)}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что при охвате системы цепью отрицательной обратной связи относительное изменение передаточной функции $\delta_{\Phi(p)}$, вызванное относительным изменением $\delta_{W_1^*(p)}$ передаточной функции прямой цепи преобразования $W_1^*(p)$, уменьшается в $\left[1 + W_1^*(p) \cdot W_{\text{ОС}}(p)\right]$ раз, а относительное изменение передаточной функции $\delta_{W_{\text{ОС}}(p)}$, вызванное относительным изменением передаточной функции цепи обратной связи $W_{\text{ОС}}(p)$, остается без изменений. Это определяет необходимость очень тщательно подходить к конструированию датчика момента (обратного преобразователя) и обеспечению стабильности параметров элементов его составляющих [11—13].

Каждый из элементов структурной схемы МА, изображенной на рис. 1, вносит свою долю в общую погрешность маятникового акселерометра как измерительного прибора. В соответствии с выражением (8) погрешности одних элементов снижаются, а других — остаются без изменения и оказывают ключевое влияние на общую погрешность измерения, соответственно эти элементы устройства будут ключевыми для снижения погрешности.

Определение этих ключевых элементов, как электронных, так и электромеханических, оценка их влияния на суммарную погрешность измерения и принятие мер по ее снижению являются важными задачами.

Математическая модель погрешности маятникового акселерометра. Типовая электрическая схема маятникового акселерометра с фотодатчиком угла и магнитоэлектрическим датчиком момента показана на рис. 2 (ИТ — источник тока; М — маятник; SD — светодиод; DA — операционный усилитель).

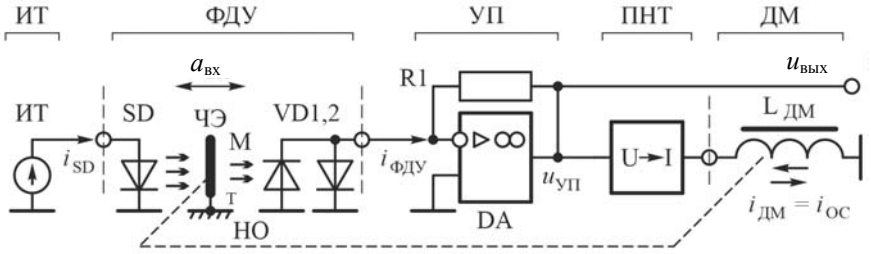


Рис. 2

Маятник связан с неподвижным основанием (НО) через упругий торсион (Т). При воздействии ускорения $a_{вх}$ на подвижную массу возникает момент инерционных сил

$$M_{и} = ml \cdot a_{вх}\,. \tag{9}$$

В результате воздействия ускорения маятник отклоняется на некоторый угол α, измеряемый фотодатчиком угла и преобразуется в электрический ток $i_{ФДУ}$, который усиливается линейным усилителем-преобразователем. Усиленный сигнал — выходное напряжение $u_{вых}$ — является выходным и одновременно поступает в цепь компенсации — подается на ПНТ, с выхода которого, в виде тока обратной связи $i_{ОС}$, поступает на ДМ. Последний создает момент обратной связи

$$M_{ОС} = i_{ОС}k_{ДМ}. \tag{10}$$

Реальная система с обратной связью работает с ошибкой ΔM

$$\Delta M = M_{и} - M_{ОС}\,. \tag{11}$$

На структурной схеме МА (см. рис. 1) ошибка ΔM формируется как разность измеряемого момента инерции $M_{и}$ и компенсирующего момента обратной связи $M_{ОС}$ в суммирующем устройстве СмУ. Конструктивно (см. рис. 2) суммирующее устройство представляет маятник, на который в пространстве одновременно с противоположными знаками воздействуют моменты $M_{и}$ и $M_{ОС}$. Сигнал ошибки ΔM формируется на выходе фотодатчика ФДУ в виде тока $i_{ФДУ}$.

Структурно-динамическая схема маятникового акселерометра с выходным сигналом в виде тока $i_{ФДУ}$ показана на рис. 3

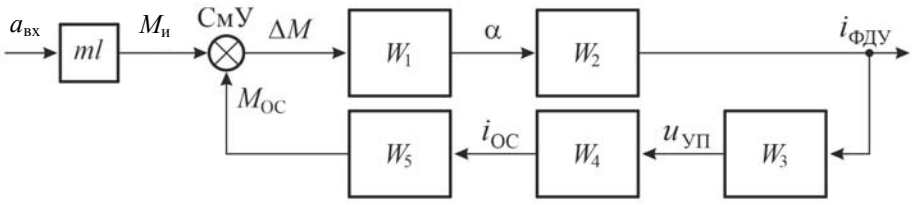


Рис. 3

В этом случае передаточная функция замкнутой системы будет

$$\Phi^{*}(p) = \frac{M_{ОС}}{M_{и}} = \frac{W_1^{**}(p)}{1 + W_1^{**}(p) \cdot W_{ОС}^{*}(p)}, \tag{12}$$

а передаточные функции $W_1^{**}(p)$ и $W_{ОС}^{*}(p)$ будут

$$W_1^{**}(p) = \frac{k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1};$$

$$W_{\text{ОС}}^{*}(p) = \frac{k_{\text{УП}} \cdot k_{\text{ПНТ}} \cdot k_{\text{ДМ}}}{T_{\text{ДМ}} p + 1} \approx k_{\text{УП}} \cdot k_{\text{ПНТ}} \cdot k_{\text{ДМ}} = k_{\text{ОС}}.$$

После преобразования получим

$$\Phi^{*}(p) = \frac{ml \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1 + k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}}}. \tag{13}$$

В установившемся режиме $p = 0$, соответственно

$$\frac{i_{\text{ФДУ}}}{a_{\text{вх}}} = \frac{ml \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1}, \tag{14}$$

а ток фотодатчика

$$i_{\text{ФДУ}} = a_{\text{вх}} \cdot \frac{ml \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}}{k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1}. \tag{15}$$

Каждый из элементов суммирующего устройства в той или иной степени подвержен воздействию различных внешних факторов, приводящих к изменению значений его параметров, изначально принятых для расчета как исходные. В общем виде для функции $y = F(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ влияние отклонения параметров Δx_n от номинального значения на изменение выходной величины Δy определяется как сумма модулей произведений частных производных по каждому параметру $\partial F/\partial x_n$ и изменения влияющих величин Δx_n [14]:

$$\Delta y = \left|\frac{\partial F}{\partial x_1}\right| \Delta x_1 + \left|\frac{\partial F}{\partial x_2}\right| \Delta x_2 + \cdots + \left|\frac{\partial F}{\partial x_n}\right| \Delta x_n.$$

Применяя последнее выражение для работы МА, не будем учитывать две составляющие — значение входного ускорения $a_{\text{вх}}$, поскольку это измеряемая величина, и массу m, поскольку исходя из общих соображений можно предположить, что под действием дестабилизирующих факторов масса маятника не изменяется. В этом случае для рассматриваемого маятникового акселерометра $y = F(l, k_{\text{ЧЭ}}, k_{\text{ОС}}, k_{\text{ФДУ}})$, а нестабильность $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ фотодатчика угла будет

$$\Delta i_{\text{ФДУ}} = \left|\frac{\partial F}{\partial l}\right| \Delta l + \left|\frac{\partial F}{\partial k_{\text{ЧЭ}}}\right| \Delta k_{\text{ЧЭ}} + \left|\frac{\partial F}{\partial k_{\text{ФДУ}}}\right| \Delta k_{\text{ФДУ}} + \left|\frac{\partial F}{\partial k_{\text{ОС}}}\right| \Delta k_{\text{ОС}}. \tag{16}$$

Определим частные производные, используемые в выражении (16):

1) $\dfrac{\partial F}{\partial l} = \dfrac{\left(a_{\text{вх}} \cdot m \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}\right) \cdot \left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2};$

2) $\dfrac{\partial F}{\partial k_{\text{ЧЭ}}} = \dfrac{a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{ФДУ}}}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2}$; 3) $\dfrac{\partial F}{\partial k_{\text{ФДУ}}} = \dfrac{a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{ЧЭ}}}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2}$;

3) $\dfrac{\partial F}{\partial k_{\text{ОС}}} = \dfrac{\left(a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}\right) \cdot \left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}\right)}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2}.$

Подставим полученные значения в выражение (16)

$$\Delta i_{\text{ФДУ}} = \frac{\left(a_{\text{вх}} \cdot m \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}\right) \cdot \left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2} \cdot \Delta l +$$

$$+ \frac{a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{ФДУ}}}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2} \cdot \Delta k_{\text{ЧЭ}} + \frac{a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{ЧЭ}}}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2} \cdot \Delta k_{\text{ФДУ}} + \tag{17}$$

$$+ \frac{\left(a_{\text{вх}} \cdot ml \cdot k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}\right) \cdot \left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}}\right)}{\left(k_{\text{ЧЭ}} \cdot k_{\text{ФДУ}} \cdot k_{\text{ОС}} + 1\right)^2} \cdot \Delta k_{\text{ОС}}.$$

Нестабильность работы фотодатчика угла $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ фактически определяет как температурную стабильность коэффициента преобразования $\Delta k_{\text{пр.а}}$ акселерометра, так и дрейф (смещение) нуля $\Delta a_{\text{вх}}$. В таблице показаны типовые значения этих параметров для некоторых маятниковых акселерометров.

Основные параметры типовых МЭМС-акселерометров

Параметр	Акселерометр (производитель)			
	А4 (Litton, США)	АК-5 (НПО „МИЗА“)	А-12 („Раменское“ ПКБ)	Д-10 (ЦНИИ „Электроприбор“)
$\Delta k_{\text{пр.а}}$, 1/°С	$1 \cdot 10^{-5}$	$(3—10) \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
$\Delta a_{\text{вх}}$, м/с^2	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$

Типовые значения температурной погрешности коэффициента преобразования $\Delta k_{\text{пр.а}}$ и смещения нуля $\Delta a_{\text{вх}}$ показывают, что нестабильность работы фотодатчика $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ находится на уровне $(1—10) \cdot 10^{-6}$ мА/°С.

В соответствии с обратной задачей теории погрешностей [15] необходимо определить абсолютные погрешности аргументов функции, чтобы абсолютная погрешность функции не превышала заданной величины. Эта задача математически не определена, так как заданную предельную погрешность $\Delta i_{\text{ФДУ}}$ функции $y = F(l,\ k_{\text{ЧЭ}},\ k_{\text{ОС}},\ k_{\text{ФДУ}})$ можно обеспечить, поразному устанавливая предельные абсолютные погрешности ее аргументов. Наиболее часто обратная задача решается согласно так называемому принципу равных влияний: принимается, что все частные дифференциалы выражения (16) одинаково влияют на образование общей абсолютной погрешности. Соответственно любая из составляющих выражения (16) должна быть меньше всей суммы и в среднем иметь значение на уровне $\frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$ или меньше:

— нестабильность линейных размеров l маятника: $\left|\frac{\partial F}{\partial l}\right| \Delta l \le \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$;

— нестабильность коэффициента $k_{\text{ЧЭ}}$: $\left|\frac{\partial F}{\partial k_{\text{ЧЭ}}}\right| \Delta k_{\text{ЧЭ}} \le \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$;

— нестабильность коэффициента $k_{\text{ФДУ}}$: $\left|\frac{\partial F}{\partial k_{\text{ФДУ}}}\right| \Delta k_{\text{ФДУ}} \le \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$;

— нестабильность коэффициента $k_{\text{ОС}}$: $\left|\frac{\partial F}{\partial k_{\text{ОС}}}\right| \Delta k_{\text{ОС}} \le \frac{1}{4} \cdot \Delta i_{\text{ФДУ}}$.

Составляющая Δl в выражении отражает механическую стабильность чувствительного элемента акселерометра и в первую очередь зависит от коэффициента линейного расширения применяемого материала.

Составляющая $\Delta k_{\text{ОС}}$ отражает стабильность датчика момента — электромагнитного преобразователя „электрический ток—магнитный поток“ и зависит от магнитных свойств и

температурной стабильности сердечника и обмотки, а также от стабильности работы электронных блоков усилителя-преобразователя и преобразователя „напряжение—ток“.

Составляющие $\Delta k_{\text{ЧЭ}}$ и $\Delta k_{\text{ФДУ}}$ отражают стабильность работы чувствительного элемента и фотодатчика угла. Схемотехника и точностные параметры ЧЭ и ФДУ в настоящей статье не рассматриваются, но схемотехнической основой, определяющей точностные параметры этих устройств, является такое электронное устройство, как источник опорного напряжения (ИОН). Дрейф выходного напряжения типового нетермостатированного ИОН находится на уровне $(1—10)\cdot10^{-6}$ В/°С [16, 17], что определяет дрейф работы электронных блоков ЧЭ и ФДУ на таком же уровне стабильности.

Заключение. Общая абсолютная погрешность акселерометра образуется как сумма погрешностей линейных размеров маятника l и коэффициентов преобразования чувствительного элемента $k_{\text{ЧЭ}}$, обратной связи $k_{\text{ОС}}$ и фотодатчика угла $k_{\text{ФДУ}}$.

Точностные параметры ЧЭ и ФДУ определяются дрейфом ИОН, значение которого находится на уровне $(1—10)\cdot10^{-6}$ В/°С (1—10 ppm), что определяет погрешность ЧЭ и ФДУ на уровне единиц ppm.

Для снижения температурной погрешности коэффициента преобразования $\Delta k_{\text{пр.а}}$ и смещения нуля $\Delta a_{\text{вх}}$ акселерометра необходимо:

— применять качественные и стабильные материалы как для маятника l, так и для электромагнитного преобразователя ДМ;

— применять более стабильные ИОН и совершенствовать схемотехнику блоков УП, ПНТ, ФДУ;

—применять интеллектуальные режимы работы акселерометра, в которых по прямым или косвенным признакам функционирования элементов акселерометра возможно значительное снижение погрешности измерения ускорения.

Значительное улучшение точностных параметров одного из ключевых элементов акселерометра не приводит к существенному улучшению общих точностных параметров. К решению этой задачи необходимо подходить комплексно и одновременно улучшать параметры каждого из критичных элементов устройства, что составляет определенные и известные конструктивные и технологические трудности.

Применение более качественных механических материалов и более стабильных радиоэлементов, чем в существующих элементах маятникового акселерометра, обеспечит совершенствование конструкции и улучшение параметров маятниковых акселерометров.

Построение интеллектуального маятникового акселерометра требует поиска прямых или косвенных признаков функционирования акселерометра, по которым возможно найти значение искомого параметра и в дальнейшем скорректировать. Так, в работах [18—20] в качестве сравниваемой физической величины выбран временной интервал (частота), который непосредственно в определении коэффициента $k_{\text{пр.а}}$ не участвует, но однозначно позволяет определить его текущее значение. Фактически в этих работах временной интервал выбран в качестве параметра, при помощи которого осуществляется сравнение измеряемой величины и компенсирующего воздействия, т.е. аналог блока ЧЭ и ФДУ, а генераторы, стабилизированные кварцевым резонатором, как известно, обладают высокой стабильностью генерируемой частоты [21]. Стабильность кварцевых генераторов $\Delta f/\Delta T$ в целом составляет $(1,0—10,0)\cdot10^{-8}$ Гц/°С, или $(1,0—10,0)\ 10^{-2}$ ppm. Это значение стабильности частоты в среднем на два-три порядка выше стабильности параметров лучших радиоэлементов (металлофольговых резисторов) и нетермостатированных ИОН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дубовской В. Б., Кисленко К. В., Пшеняник В. Г.* Методика повышения точности навигационного обеспечения космических аппаратов, оснащенных высокочувствительными акселерометрами // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 590—595.
2. *Аш Ж.* и др. Датчики измерительных систем. М.: Мир, 1992. 480 с.
3. *Лучко С. В., Ватутин М. А.* Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 62.
4. *Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Ключников А. И., Ефимов В. П.* Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43—46.
5. Резисторы постоянные металлофольговые Р2-67 [Электронный ресурс]: <http://reom.ru/katalog/18/16/>. (дата обращения 11.09.2022 г.)
6. Десять причин выбрать фольговые резисторы Vishay для вашего проекта [Электронный ресурс]: <https://www.compel.ru/lib/54355>. (дата обращения 11.09.2022 г.)
7. *Арбузов В. П.* Измерительные цепи прямого преобразования для емкостных акселерометров и гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 997—1004.
8. *Волович Г. И.* Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Изд. дом „Додэка-XXI“, 2005.
9. *Депутатова Е. А., Гнусарев Д. С., Калихман Д. М.* Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 6. С. 1091—1098. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098.
10. *Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Буянкин М. П., Петухов А. Б., Ключников А. И.* Влияние параметров микромеханического акселерометра на стабильность его передаточной функции // Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. „Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации“. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. Т. 3. С. 153—157.
11. *Скоробогатов В. В.* Проблемы разработки широкодиапазонного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и пути их решения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 10. С. 17—28.
12. *Волков В. Л.* Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 2(87). С. 288—295.
13. *Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Лепешкина Е. С.* Бортовой комплекс управления для наноспутника CubeSat на базе технологии „система на кристалле“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 403—408.
14. Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. *Е. М. Душина*. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
15. *Демидович Б. П., Марон И. А.* Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966.
16. *Пушкарев М.* Интегральные источники опорного напряжения // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 71—76.
17. *Староверов К.* Новое семейство прецизионных ИОН REF50XX // Новости электроники. 2008. № 14. С. 22—26.
18. *Буянкин М. П., Ватутин М. А., Ключников А. И.* Адаптация маятникового акселерометра компенсационного типа к возмущающим факторам космического пространства // Вестн. Российского нового университета. Сер. „Сложные системы: модели, анализ и управление“. 2020. Вып. 1/2020. С. 55—59.
19. *Ватутин М. А., Буянкин М. П., Ключников А. И.* Методика определения параметров маятникового акселерометра по его частотной характеристике // Сб. тр. молодых ученых 46 ЦНИИ Минобороны России. М., 2016. 115 с.
20. *Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Трофимов И. А., Буянкин М. П.* Имитационная модель интеллектуального акселерометра // Сб. тр. ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. № 657. С. 87—96.

21. Кварцевые генераторы, фильтры, резонаторы, кристаллические элементы. Прайс-лист. СПб: ОАО „Морион“, 2012.

Сведения об авторах

Михаил Алексеевич Ватутин — канд. техн. наук, доцент, ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления, E-mail: vatutinm@inbox.ru

Алексей Игоревич Ключников — соискатель; 1-й ГИК МО РФ, кафедра автономных систем управления; старший инженер-испытатель; E-mail: keynikov198@gmail.com

Поступила в редакцию 11.11.22; одобрена после рецензирования 21.11.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Dubovskoy V.B., Kislenko K.V., Pshenyanik V.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 7(61), pp. 590–595. (in Russ.)
2. Asch G. *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Paris, Dunod, 1987.
3. Luchko S.V., Vatutin M.A. *Journal of Instrument Engineering,* 2005, no. 6(48), pp. 62. (in Russ.)
4. Luchko S.V., Baluyev S.Yu., Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Klyuchnikov A.I., Efimov V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, no. 12(56), pp. 43–46. (in Russ.)
5. http://reom.ru/katalog/18/16. (in Russ.)
6. https://www.compel.ru/lib/54355. (in Russ.)
7. Arbuzov V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 11(62), pp. 997–1004. (in Russ.)
8. Volovich G.I. *Skhemotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovykh elektronnykh ustroystv* (Circuitry of Analog and Analog-Digital Electronic Devices), Moscow, 2005. (in Russ.)
9. Deputatova E.A., Gnusarev D.S., Kalikhman D.M. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, no. 6(18), pp. 1091–1098, DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098. (in Russ.)
10. Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Buyankin M.P., Petukhov A.B., Klyuchnikov A.I. *Problemy sozdaniya i primeneniya malykh kosmicheskikh apparatov i robototekhnicheskikh sredstv v interesakh Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* (Problems of Creation and Application of Small Spacecraft and Robotic Means in the Interests of the Armed Forces of the Russian Federation), Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2016, vol. 3, April, pp. 153–157. (in Russ.)
11. Skorobogatov V.V. *News of TulSU. Technical sciences*, 2016, no. 10, pp. 17–28. (in Russ.)
12. Volkov V.L. *Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev*, 2011, no. 2(87). pp. 288–295. (in Russ.)
13. Khanov V.Kh., Shakhmatov A.V., Chekmarev S.A., Lepeshkina E.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 5(61), pp. 403–408. (in Russ.)
14. Dushin E.M., ed., *Osnovy metrologii i elektricheskiye izmereniya* (Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements), Leningrad, 1987. (in Russ.)
15. Demidovich B.P., Maron I.A. *Osnovy vychislitel'noy matematiki* (Fundamentals of Computational Mathematics), Moscow, 1966. (in Russ.)
16. Pushkarev M. *Components and Technologies*, 2007, no. 6, pp. 71–76. (in Russ.)
17. Staroverov K. *Electronics News*, 2008, no. 14, pp. 22–26. (in Russ.)
18. Buyankin M.P., Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. *Bulletin of the Russian New University. The series "Complex systems: models, analysis and management"*, 2020, no. 1/2020, pp. 55–59. (in Russ.)
19. Vatutin M.A., Buyankin M.P., Klyuchnikov A.I. *Sbornik trudov molodykh uchenykh 46 TSNII Minoborony Rossii* (Collection of Works of Young Scientists of the 46 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia), Moscow, 2016, 115 p. (in Russ.)
20. Vatutin M.A., Kuzmichev Yu.A., Trofimov I.A., Buyankin M.P. *Collection of works of the A.F. Mozhaisky VKA*, St. Petersburg, 2017, no. 657, pp. 87–96. (in Russ.)
21. *Kvartsevyye generatory, fil'try, rezonatory, kristallicheskiye element* (Quartz Generators, Filters, Resonators, Crystal Elements), Price list, St. Petersburg, 2012. (in Russ.)

Data on authors

Mikhail A. Vatutin — PhD, Associate Professor, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems, E-mail: vatutinm@inbox.ru

Alexey I. Klyuchnikov — Applicant; 1st State Test Cosmodrome, Department of Autonomous Control Systems; Senior Test Engineer; E-mail: keynikov198@gmail.com

Received 11.11.22; approved after reviewing 21.11.22; accepted for publication 28.02.23.

УДК 004.72
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-285-296

МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАНИРОВЩИКА И КОНТРОЛЯ ДОСТАВКИ

К. И. Никишин

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия,
nkipnz@mail.ru

Аннотация. Предложен метод передачи данных с использованием планировщика и функции контроля доставки в программно-конфигурируемых сетях, разработан алгоритм его работы. Рассмотрен возможный вариант аппаратной реализации коммутатора OpenFlow, выполняющего обработку и передачу разнородного трафика. Описаны особенности функционирования основных узлов коммутатора — планировщика расписания и валидатора времени доставки. На основе предложенного метода проведено моделирование программно-конфигурируемых сетей с помощью аппарата сетей Петри. Исследованы вероятностно-временные характеристики модели, проведена верификация метода с использованием сетей Петри. Эффективность предложенного метода заключается в том, что загрузка коммутатора остается постоянной за счет более гибкой настройки расписания планировщика (вместо использования жестких тайм-аутов), а также возможности досрочной передачи стандартных данных.

Ключевые слова: *программно-конфигурируемые сети, OpenFlow, коммутатор, Ethernet, трафик, режим реального времени, планировщик расписания, контроль доставки кадров, сети Петри*

Ссылка для цитирования: *Никишин К. И.* Метод передачи данных в программно-конфигурируемых сетях с использованием планировщика и контроля доставки // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 285—296. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-285-296.

METHOD OF DATA TRANSMISSION IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS USING A SCHEDULER AND RATE CONTROL

K. I. Nikishin

Penza State University, Penza, Russia
nkipnz@mail.ru

Abstract. A method of data transmission using a scheduler and a delivery control function in software-defined networks is proposed, and an algorithm for its operation is developed. A possible variant of the hardware implementation of the OpenFlow switch, which performs the processing and transmission of heterogeneous traffic, is considered. The features of the functioning of the main nodes of the switch - the scheduler and the delivery time validator - are described. On the basis of the proposed method, modeling of software-defined networks using the apparatus of Petri nets is carried out. The probabilistic-temporal characteristics of the model are studied, and the method is verified using Petri nets. The effectiveness of the proposed method lies in the fact that the switch load remains constant due to more flexible scheduler settings (instead of using hard timeouts), as well as the possibility of early transmission of standard data.

Keywords: software-defined networks, OpenFlow, switch, Ethernet, traffic, real-time mode, scheduler, frames delivery control, Petri nets

For citation: Nikishin K. I. Method of data transmission in software-defined networks using a scheduler and rate control. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 285—296 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-285-296.

© Никишин К. И., 2023

В современном мире информационные технологии играют ключевую роль. Совершенствуются и создаются новые программные продукты, улучшая ту или иную сферу современного общества. Главной транспортной составляющей в работе любого программного продукта, автоматизированной системы, Интернета является компьютерная сеть.

Исторически первой сетью является классическая Ethernet [1]. Для приоритизации разнородного трафика в сети используется технология Quality of Service, QoS [2—4]. Однако, как и любой программный продукт, компьютерные сети стремительно развиваются. Возникают прорывные технологии, которые будут играть значимую роль, к такой категории могут относиться распределенные сети. Причиной широкого применения и развития распределенных сетей стало ограничение временных характеристик классической компьютерной сети Ethernet согласно стандарту IEEE 802.1*. Кроме этого, в современных условиях накладываются новые ограничения по передаче данных в режиме реального времени, разбросу средней задержки на выходе коммутатора (джиттер) и отказоустойчивости сети.

К распределенным сетям относятся Time-Triggered Ethernet [5, 6], программно-конфигурируемые сети (ПКС), облачные вычисления. Сетевое оборудование, используемое для обработки потоков данных, должно обладать свойствами мобильности, быстроты, простоты администрирования. Всем этим требованиям отвечают ПКС [7, 8]. В ПКС выделяют уровни: приложений, управления и инфраструктурный. Основным элементом ПКС является контроллер, ведущий обработку данных и рассчитывающий оптимальные маршруты для их передачи в коммутаторы. Обмен данными производится через протокол OpenFlow [7—9].

Входящий поток поступает в работающий по протоколу OpenFlow коммутатор ПКС, в одной из таблиц потоков которого выполняется поиск соответствующих наборов значений потока. Таблица потоков включает поля стандарта IEEE 802.1, приоритета, счетчики, инструкции, тайм-ауты.

Однако передача классическим методом в ПКС разнородных потоков данных — в реальном масштабе времени и стандартных данных (иначе — эластичного, или стохастического, трафика) [10—12] характеризуется рядом недостатков:

1) аппаратные ресурсы распределенной компьютерной сети тратятся на сбор, вычисление и установку тайм-аутов (предложенный в настоящей статье метод лишен этого недостатка);

2) значительное время поиска правила в таблицах потоков протокола OpenFlow. Из-за увеличения времени поиска о необходимости удаления потока из ПКС контроллер информируется на более позднем этапе. Таким образом, необходимо выполнять поиск тайм-аутов для потока в таблицах потоков, пока не будет найдено нужное правило или будет удален поток из ПКС.

Кроме этого, вследствие различия архитектур и топологий ПКС контроллер также может медленно реагировать на сигнал удаления потока из ПКС. В таком случае время на принятие решения для повторной передачи данных может быть увеличено, поскольку в передаче участвуют уже несколько контроллеров;

3) отсутствует контроль функций доставки данных на входных портах коммутаторов OpenFlow. Из-за этого затруднительно определить возможность доставки данных в необходимые моменты времени;

4) возникает необходимость прерывания потока стандартных данных в случае временного конфликта между различными видами трафика в коммутаторе. Это способствует уменьшению пропускной способности сети из-за повторной передачи прерванного потока стандартных данных.

* https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q.

По результатам анализа классического метода разработан метод передачи данных с использованием планировщика и функцией контроля доставки в ПКС. Предложенный метод устраняет недостатки, аппаратно упрощаются таблицы потоков и их структура.

Согласно разработанному методу, в каждый коммутатор ПКС вводится специальный аппаратный планировщик трафика, который обеспечивает своевременную доставку данных пользователю или конечному оборудованию. За счет досрочной передачи стандартных данных усовершенствуется алгоритм диспетчера очередей коммутатора.

Диспетчеры очередей в классических коммутаторах Ethernet и ПКС не могут в один момент времени передавать различные виды данных. Предложенный метод, если позволяет длина кадра, дает возможность передавать стандартные данные досрочно — во время блокировки кадром реального времени.

Аппаратный планировщик трафика (рис. 1) состоит из таблицы расписания планировщика, усовершенствованного узла классификации разнородных данных и узла валидации времени доставки кадров реального времени.

Рис. 1

Классический классификатор коммутатора в зависимости от приоритета направляет кадр в соответствующую очередь, в то время как модифицированный классификатор совместно с остальными узлами планировщика трафика позволяет передавать кадр в выходной порт коммутатора, в очереди кадров или удалить его.

Планировщик расписания добавляется в каждый коммутатор OpenFlow, он управляет входящим трафиком. Рассылка данных и настройка расписания выполняются на уровне приложения через API и функции ПКС. Таким образом, в статье используется заранее подготовленное синхронизированное расписание для каждого коммутатора ПКС.

Таблицы потоков упрощаются за счет удаления функций контроля тайм-аутов. Трафик направляется через входящий порт коммутатора к таблицам потоков, где выполняется поиск правила для потока, при этом некоторые поля найденного правила могут быть недоступны для чтения (замаскированы).

Если в заданной таблице для потока не найдено правило, то он переходит в следующую подсеть Петри таблицы потоков, где происходят дальнейший поиск и сравнение с правилами. Входящий поток, для которого после поиска по всем таблицам не будет обнаружено правило, удаляется из сети и об этом информируется контроллер.

Если правило для потока найдено, в работу включается планировщик расписания трафика. Планировщик расписания классифицирует принятый поток в зависимости от типа трафика: реального времени или стандартных данных. При этом для каждого потока реального времени фиксируется время прибытия в коммутатор OpenFlow.

После этого поток реального времени направляется в узел валидатора времени доставки потока, где время прибытия потока сравнивается с указанным в расписании. При этом валидатор времени доставки также может удалить поток реального времени, если время его прибытия превысит заранее известное время из расписания.

Узел дешифратора инструкций может выполнить одну из команд с потоком реального времени: направить непосредственно в выходной порт (канал) коммутатора OpenFlow или поместить поток в специально отведенную для него очередь.

Если совпадают время прибытия кадра реального времени и время доставки из расписания, выполняется передача принятого кадра в выходной порт коммутатора. Если время

прибытия кадра реального времени меньше времени доставки из расписания, он помещается в отдельную очередь.

Поток стандартных данных распределяется в отдельные очереди с помощью узла классификации. Валидатор времени доставки с помощью таймера определяет наступление очередного момента времени доставки для потока реального времени. Если время доставки не наступило, то управление передается диспетчеру очередей, который начинает работать только при наличии свободного выходного канала и при загруженных потоками очередях.

В коммутаторах Ethernet основным элементом управления является диспетчер очередей, что обусловливает необходимость разработки эффективных алгоритмов диспетчеризации с учетом многокритериальных параметров управления диспетчерами коммутатора [13]. К наиболее эффективным относятся различные циклические алгоритмы (Round Robin, RR) и взвешенные справедливые (Weighted Fair Queuing, WFQ).

К эффективным относится новый алгоритм с временной селекцией кадров (Time Selection Service, TSS), показатели эффективности при управлении очередями которого подробно описаны в статьях [14, 15]. Его основное отличие заключается в учете времени ожидания кадров в очередях и ограничении времени обслуживания очередей, что, в свою очередь, приводит к уменьшению разброса среднего значения задержки в сети.

Предложенный в настоящей статье метод использует другой алгоритм диспетчеризации (рис. 2) в коммутаторе OpenFlow, разработанный ранее для распределенной сетевой технологии Time-Triggered Ethernet [16], но в ином временном масштабе. Диспетчер проверяет возможность передачи потока стандартных данных, прежде чем наступит момент доставки очередного потока реального времени:

$$T_{\text{тек}} + T_{\text{ст}} \le T_{\text{бл}} + T_{\text{рв}},$$

где $T_{\text{тек}}$ — текущее время в системе, $T_{\text{ст}}$ — время передачи потока стандартных данных с учетом длины кадров, $T_{\text{бл}}$ — время блокировки, $T_{\text{рв}}$ — время передачи потока реального времени.

Входящими параметрами для диспетчера очередей являются размер (длина) кадров в потоке и время поступления потока в очередь для каждого из видов трафика. Исходя из этих параметров диспетчер проверяет следующее условие: сумма текущего момента времени системы и времени передачи потока стандартных данных с учетом длины кадров должна быть меньше времени доставки очередного кадра реального времени. Учитывается, за какое время коммутатор сможет передать поток на выходной порт с учетом длины кадров.

Если заданное условие выполняется, то поток стандартных данных передается из соответствующей очереди, иначе — ожидается момент доставки очередного потока реального времени, и когда этот момент наступает, осуществляется передача потока из выбранной очереди в выходной канал.

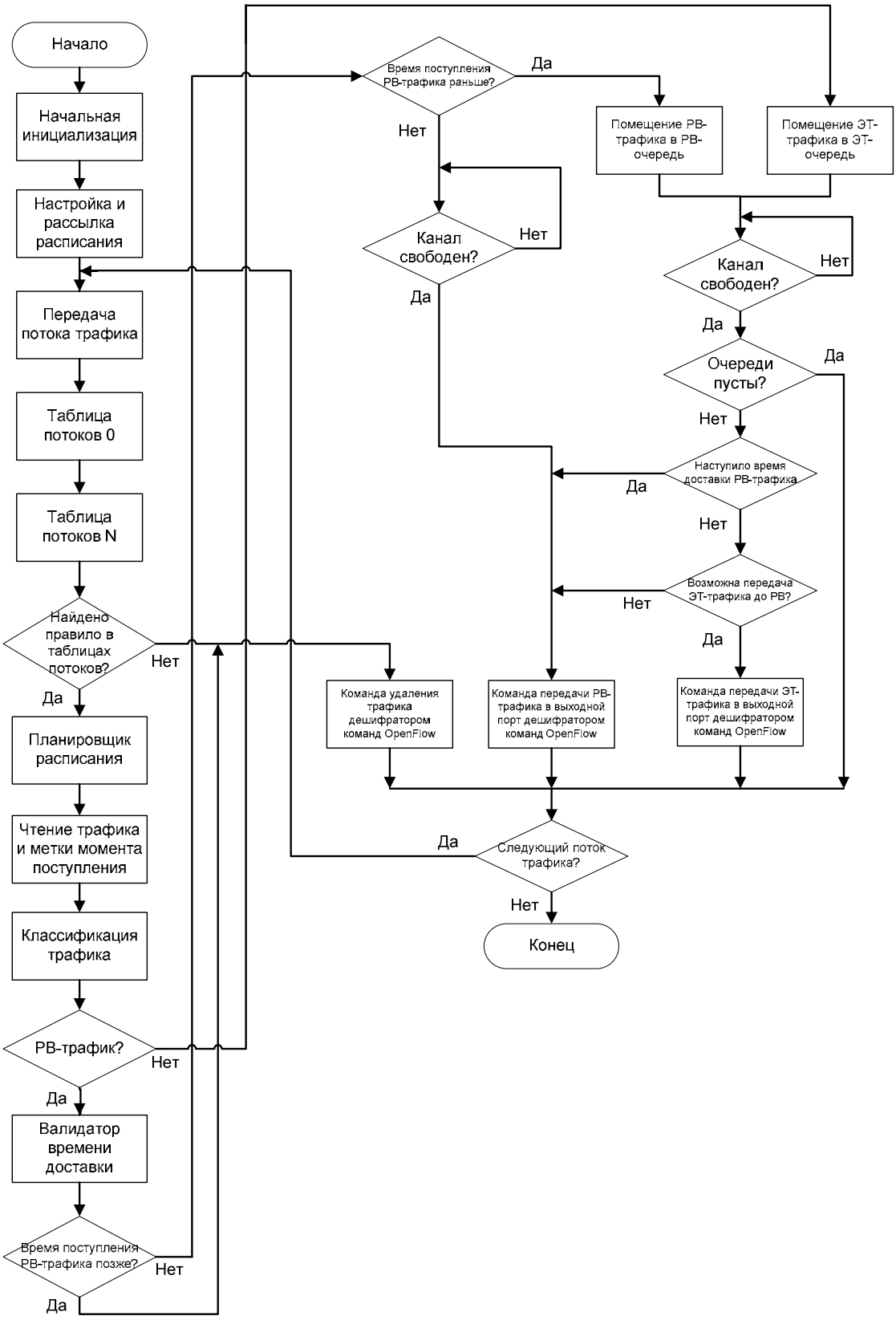


Рис. 2

На рис. 3 показан возможный вариант реализации архитектуры коммутатора на основе OpenFlow, выполняющего обработку и передачу разнородного трафика. Основные узлы аппаратной архитектуры: *1* — шина приема кадров из аппаратуры продвижения и передачи в порт назначения коммутатора; *2* — валидатор времени доставки данных; *3* — планировщик

расписания потока реального времени; *4* — таблица потоков 0; *5* — классификатор поступающего трафика и канал прямой записи в память; *6* — таблица потоков *N*; *7* — шина чтения кадров из очередей; *8* — шина передачи кадров в очередь или на выходной порт; *9* — процессор диспетчеризации; *10* — сигнал „очереди свободны“; *11* — память типа FIFO для приема стандартных данных; *12* — память типа FIFO для приема потока кадров реального времени; *13* — дешифратор инструкций коммутатора OpenFlow; *14* — канал прямого чтения кадров из очередей или шины передачи кадров на выходной порт; *15* — физический интерфейс выходного порта; *16* — сигнал „выходной порт свободен“; *17* — шина выходного канала; *18* — контроллер ПКС.

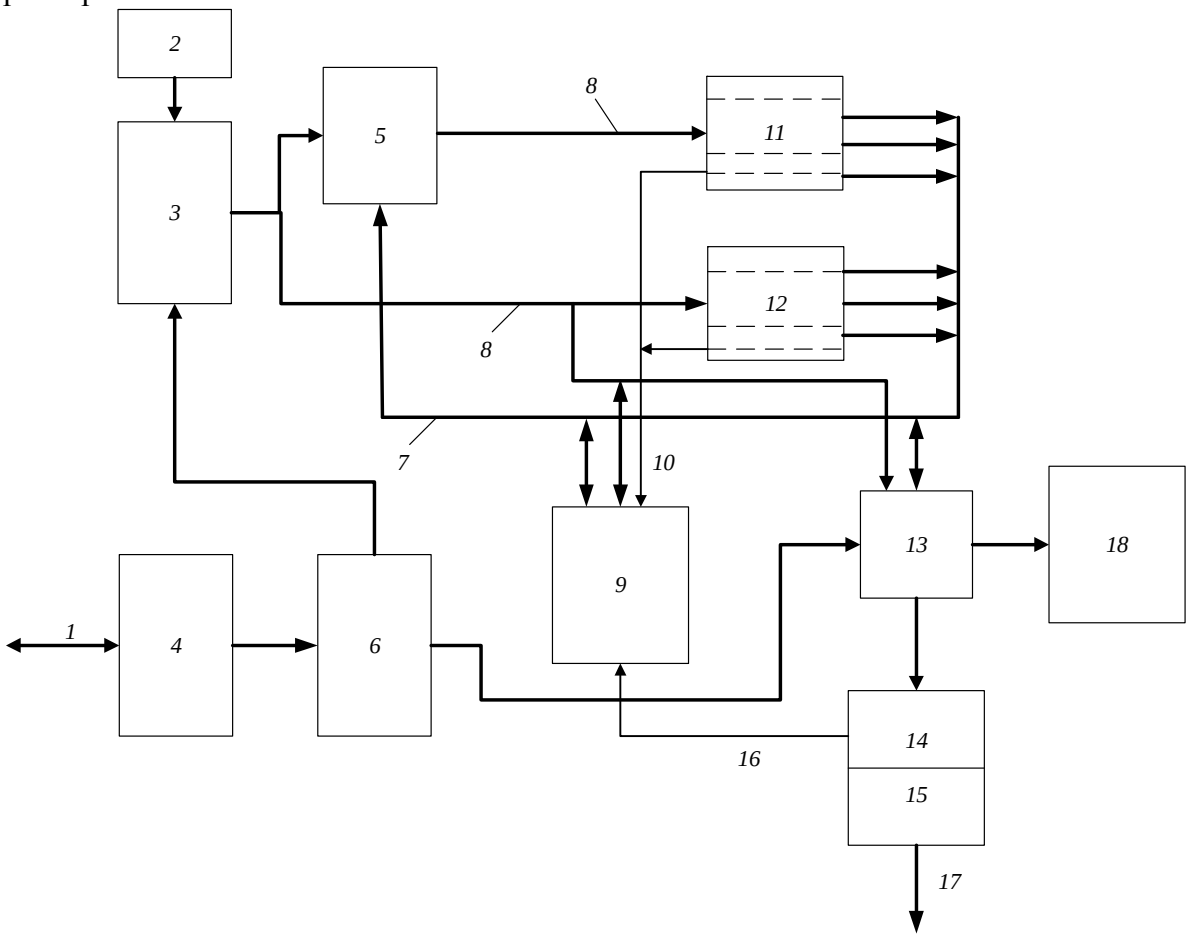


Рис. 3

Пример функционирования коммутатора, реализующего предложенный метод, представлен ниже.

В порт назначения коммутатора OpenFlow по шине *1* поступают потоки (кадры) из аппаратуры продвижения кадров, которые могут быть направлены в данный порт.

Выполняется поиск правила для входящего потока во всех таблицах потоков. Таблиц потоков может быть несколько — от 0 до *N*. Вначале выполняется поиск правила в таблице потоков 0 (на рис. 3 узел *4*), затем — в таблице потоков *N* (на рис. 3 узел *6*). Если для входящего потока не будет обнаружено правило, то информация передается дешифратору инструкций коммутатора OpenFlow *13*. Дешифратор инструкций совместно с контроллером ПКС *18* принимает решение об удалении потока из ПКС. В случае успешного поиска правила включается в работу планировщик расписания трафика *3*.

Текущий момент поступления потока кадров реального времени сравнивается с моментом доставки в планировщике расписания *3*. Валидатор времени доставки потока *2* сравнивает время прибытия потока с заранее установленным значением момента доставки.

Управляющие логические элементы и таймер сравнения времени являются основными составляющими узла *2*. Планировщик расписания представляет собой регистровую память (набор регистров), в которой хранятся таблицы расписаний со значениями моментов доставки кадров реального времени. Каждый коммутатор OpenFlow должен содержать свой планировщик расписания.

Планировщик расписания может: передавать поток стандартных данных в классификатор *5*; поместить кадры реального времени в очередь для данного трафика (текущий момент прибытия этого потока меньше момента его доставки); направить кадры реального времени сразу же в выходной канал *17* (текущий момент прибытия трафика меньше равен моменту его доставки). За выполнение инструкций отвечает дешифратор инструкций коммутатора *13* согласно протоколу OpenFlow.

Классификатор *5* разделяет потоки стандартных данных в зависимости от типа трафика и помещает в соответствующие очереди.

Потоки записываются по шине *8*, а считываются из очередей по шине *7*. Валидатор времени доставки потока *2* постоянно проверяет наступление момента доставки кадров реального времени и передает управление процессору диспетчеризации *9*. Он запускается сигналами *8* и *13*, когда очереди не пусты и выходной канал свободен. Осуществляется передача кадров в выходной канал через дешифратор инструкций *13*.

С помощью предложенного метода проведено моделирование компьютерной сети. Для этих целей выбран математический аппарат сетей Петри, выбраны цветные временные иерархические сети Петри [17], а в качестве инструмента построения таких сетей — пакет CPN Tools. Данный пакет хорошо зарекомендовал себя при исследовании телекоммуникационных и компьютерных сетей, их алгоритмов, протоколов, различного оборудования [18, 19].

На рис. 4 представлен только один узел коммутатора OpenFlow на основе сетей Петри — планировщик расписаний. В подсети Петри выполняется передача входящего потока для дальнейшей обработки в коммутаторе. В частности, поток будет направлен к подсети классификатора коммутатора. В этой подсети генерируется таблица расписаний со своей собственной структурой для входящего потока.

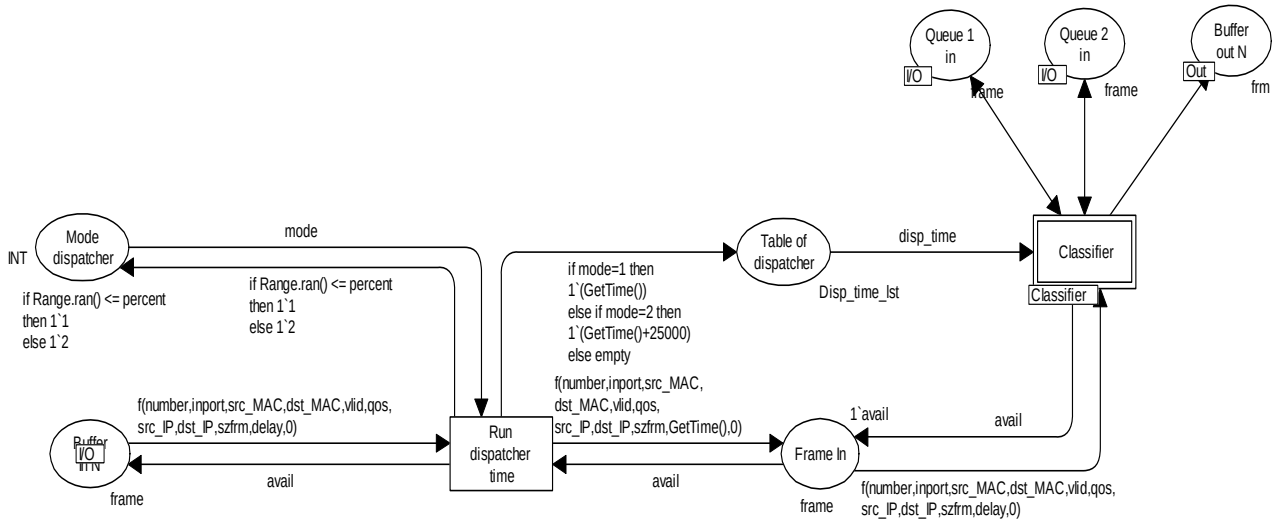


Рис. 4

Таблица расписаний также направляется в подсеть классификатора коммутатора. В дальнейшем в работу включается подсеть валидатора времени доставки потока. Модели классического метода в ПКС на сетях Петри описаны в статьях [20—22]; модель предложенного метода, алгоритмы его функционирования на сетях Петри подробно описаны в статье [23]; в [24] рассмотрена модель ранней диагностики потерь данных в ПКС на основе сетей Петри.

Было проведено экспериментальное исследование моделей классического и предложенного методов в коммутаторе OpenFlow с разной загрузкой, через коммутатор передавались 3436, 5300 и 7500 кадров. Загрузка коммутатора определяется соотношением общей суммы всех переданных битов (байтов) в коммутаторе к итоговому времени передачи всех кадров. Поэтому для загрузки коммутатора 0,4 о.е. требовалось передать 3436 кадров, аналогичным образом вычислялась загрузка коммутатора и с другим количеством кадров. При анализе результатов экспериментов выявлено увеличение загрузки коммутатора, потому что кадры в модели удаляются классическим методом. Потери возникают вследствие использования тайм-аутов по протоколу OpenFlow, когда время прибытия потоков превышает границы тайм-аутов.

В таких случаях происходит удаление потока из ПКС, выполняется инструкция удаления потока дешифратором инструкций OpenFlow и информирование контроллера об удалении потока. В свою очередь, контроллер принимает решение о повторной передаче в ПКС. Это приводит к увеличению загрузки коммутатора за счет повторной передачи: при загрузке коммутатора 0,8 о.е. появляется критическая доля удаленных кадров, приводящая к большей загрузке коммутатора (0,88 о.е.) и к неустойчивости работы коммутатора. Результаты моделирования классического и предложенного методов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты моделирования классического метода

Характеристика	Исходная загрузка коммутатора, о.е.		
	0,4	0,6	0,8
Общее число поступивших кадров	3436	5300	7500
Число удаленных кадров	231	429	738
Размер переданных кадров, бит	24824385	36986102	55221301
Размер удаленных кадров, бит	1434880	2812698	4644378
Загрузка коммутатора с учетом удаленных кадров, о.е.	0,43	0,65	0,88

Таблица 2

Результаты моделирования предложенного метода

Характеристика	Исходная загрузка коммутатора, о.е.		
	0,4	0,6	0,8
Общее число кадров	3436	5300	7500
Число досрочно переданных кадров	342	687	1227
Размер переданных кадров, бит	24824385	36986102	55221301
Размер досрочно переданных кадров, бит	2158091	4204640	6738654
Результирующая загрузка коммутатора, о.е.	0,4	0,6	0,8

Таблицы строились на основе статистических данных экспериментов в работе с моделями. В статистику включались следующие показатели: итоговое количество кадров, размер передаваемых кадров, количество удаленных кадров, размер удаленных кадров, входящее время поступления кадров в коммутатор и выходящее время передачи кадров из коммутатора.

Проводилась серия опытов с разным количеством передаваемых кадров и требуемой загрузкой. На вход коммутатора передавался трафик с различными характеристиками, такими как длина межкадрового интервала, интенсивность поступления потока стандартных данных, соотношение длины кадров и приоритетов, величина постоянного периода.

Данная статистика собиралась с помощью мониторов — встроенного инструмента в пакете CPN Tools. Показатели сети сохранялись в текстовые файлы, которые далее были обработаны с помощью Excel.

На рис. 5 представлен график распределения количества удаленных кадров из ПКС ($K_у$) при увеличении интенсивности поступления кадров с K = 3436 до 7500 [18]. На рис. 6 пред-

ставлена гистограмма сравнения загрузки коммутатора OpenFlow двумя методами процесса передачи разнородного трафика ($Z_н$ — номинальная загрузка; $Z_р$ — рабочая загрузка).

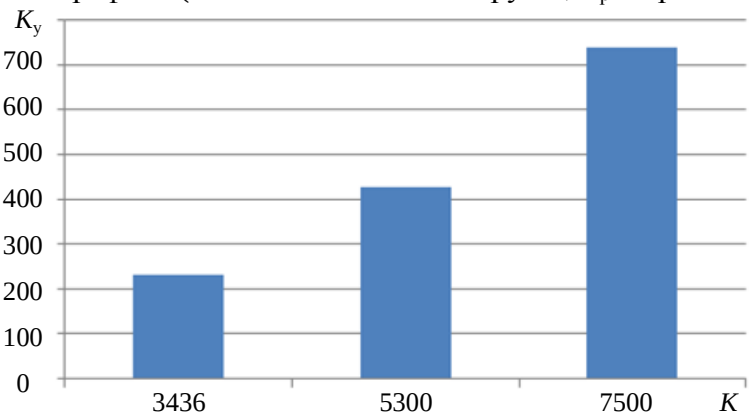


Рис. 5

При этом эффективность предложенного метода заключается в том, что загрузка коммутатора не повышается благодаря гибкому расписанию планировщика, а не наличию жестких тайм-аутов. Кроме этого, возможна передача стандартных данных до того, пока не будет передан кадр реального времени. Как можно увидеть из табл. 1 и рис. 6, в классическом методе увеличивается загрузка коммутатора на 11 %. При дальнейшем увеличении числа кадров в ПКС могут возникнуть перебои в работе коммутатора, приводя к пиковой загрузке на уровне 0,9—0,95.

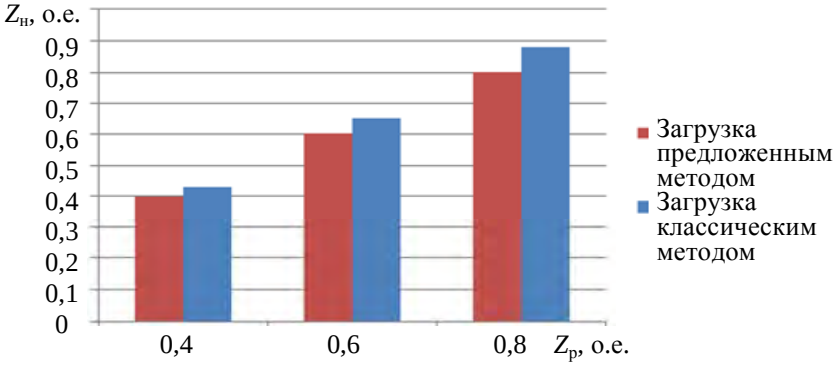


Рис. 6

На рис. 7 показаны общее число $K_д$ переданных досрочно стандартных кадров, а также доля $D_д$ таких кадров, наибольшая эффективность предложенного метода достигается при рабочей загрузке коммутатора 0,8 о.е. Таким образом, на 17 %, по сравнению с классическим методом, увеличивается возможность досрочной передачи стандартных данных.

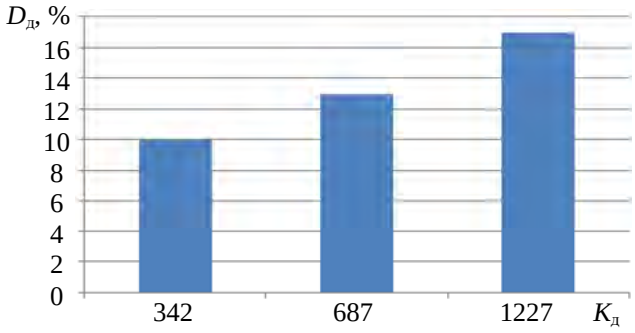


Рис. 7

Поэтому эффективность предложенного метода заключается не только в том, что загрузка коммутатора остается постоянной, но также обеспечивается возможность досрочной передачи стандартных данных во время блокировки коммутатора потоком кадров реального времени. Таким образом, коммутатор может передавать кадры стандартных данных во время ожидания

доставки кадров реального времени. Это позволяет повысить пропускную способность сети и снизить задержку, все эти показатели играют решающую роль при передаче данных по сети для конечного пользователя.

Согласно результатам моделирования предложенного метода, при увеличении интенсивности поступления кадров вероятность их потери ниже, поскольку осуществляется гибкая настройка расписания планировщика. Однако большая интенсивность поступления кадров может привести к перегрузке коммутатора, поэтому в статье рассмотрены рабочий и оптимальный варианты загрузки коммутатора.

Предложен метод передачи потоков данных с использованием планировщика и функцией контроля доставки в ПКС, разработан алгоритм его работы. Детально описаны особенности функционирования планировщика расписания и валидатора времени доставки.

Рассмотрен возможный вариант аппаратной реализации коммутатора на основе OpenFlow, выполняющего обработку и передачу разнородного трафика.

На основе предложенного метода проведено моделирование ПКС с помощью аппарата сетей Петри. Исследованы вероятностно-временные характеристики модели, проведена верификация метода с использованием сетей Петри.

Преимущества предложенного метода заключаются в том, что (1) загрузка коммутатора остается постоянной благодаря более гибкой настройке расписания планировщика, а не за счет жестких тайм-аутов; (2) обеспечивается возможность досрочной передачи потока стандартных данных, пока не наступило время доставки кадров реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Олифер В. Г., Олифер Н. А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. СПб: Питер, 2010. 943 с.

2. *Karakus M., Durresi A.* Quality of service (QoS) in software defined networking (SDN): A survey // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 80. P. 200—218.

3. *Перепелкин Д. А., Бышов В. С.* Балансировка потоков данных в программно-конфигурируемых сетях с обеспечением качества обслуживания сетевых сервисов // Радиотехника. 2016. № 11. С. 111—119.

4. *Никишин К. И.* Механизм управления трафиком реального времени в коммутаторе Ethernet // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 10. С. 32—37.

5. *Nikishin K., Konnov N.* Schedule Time-Triggered Ethernet // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). Vienna, Austria, 2020. P. 1—5. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.

6. *Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D.* Modelling of systems using Time-Triggered Ethernet // Springer Information Technologies and Mathematical Modelling — Queueing Theory and Applications. 2017. Vol. 638. Ser. Communications in Computer and Information Science. P. 303—314.

7. *McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H.* et al. Openflow: enabling innovation in campus networks // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2008. Vol. 38, N 2. P. 69—74.

8. *Shalimov A.* et al. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers // Proc. of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conf. in Russia. ACM, 2013.

9. *Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N.* Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments // Computer Networks. 2014. Vol. 61. P. 151—175.

10. *Maniu R. and Dumitru L. A.* Exploring the possibilities of a self‑ regulating SDN controller // Scientific Bulletin „Mircea cel Batran“ Naval Academy. 2015. Vol. 18, N 1. P. 58—61.

11. *Перепелкин Д. А.* Концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей с балансировкой нагрузки // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 8. С. 602—610.

12. *Ren H., Li X., Geng J.* A SDN‑based dynamic traffic scheduling algorithm // IEEE Intern. Conf. on Cyber‑Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). Chengdu, China, 2016. DOI: 10.1109/CyberC.2016.103.

13. *Механов В. Б., Кизилов Е. А.* Моделирование цветными сетями Петри обслуживания очередей алгоритмом WRR // Тр. IX. Междунар. науч.-техн. конф. „Новые информационные технологии и системы“. Ч. 1. Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. С. 67—73.

14. *Kizilov E., Konnov N., Nikishin K., Pashchenko D., Trokoz D.* Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 44. P. 01011-p.1—01011-p. 5.

15. *Кизилов Е. А., Коннов Н. Н., Механов В. Б., Никишин К. И.* Учет времени поступления кадров для управления очередями в коммутаторе // Телематика-2014: тр. XXI Всерос. науч.-метод. конф. СПб: СПбГУ ИТМО, 2014. С. 134—136.

16. *Никишин К. И., Коннов Н. Н., Гурин Е. И.* Усовершенствованный механизм передачи трафика жесткого реального времени в сети Ethernet // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 4. С. 28—38.

17. *Jensen K., Kristensen L. M.* Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin: Springer, 2009. 384 p.

18. *Никишин К. И., Коннов Н. Н.* Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 1(17). С. 299—307.

19. *Никишин К. И.* Моделирование и верификация топологий программно-конфигурируемых сетей // Вестн. Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 67—74. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-67-74.

20. *Никишин К. И.* Моделирование контроллера и верификация процесса передачи данных в программно-конфигурируемых сетях // Вестн. Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 75—83. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-75-83.

21. *Никишин К. И.* Моделирование процесса передачи трафика в программно-конфигурируемых сетях // Вестн. Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 81. С. 32—41. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-32-41.

22. *Никишин К. И.* Исследование и моделирование таблицы потоков коммутатора Openflow в программно-конфигурируемых сетях // Вестн. Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 81. С. 42—50. DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-42-50.

23. *Никишин К. И.* Моделирование процесса передачи трафика реального времени с использованием планировщика и функцией контроля доставки в программно-конфигурируемых сетях // Изв. СПбГЭТУ „ЛЭТИ“. 2023. Т. 16, № 1. С. 53—65. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-53-65.

24. *Никишин К. И.* Моделирование метода ранней диагностики потерь трафика реального времени в программно-конфигурируемых сетях на основе аппарата сетей Петри // Вестн. Поволжского государственного технологического университета. Сер. „Радиотехнические и инфокоммуникационные системы“. 2022. № 2(54). С. 47—60. DOI: 10.25686/2306-2819.2022.2.4.

Сведения об авторе

Кирилл Игоревич Никишин — канд. техн. наук; Пензенский государственный университет, кафедра вычислительной техники; доцент; E-mail: nkipnz@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.22; одобрена после рецензирования 05.12.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Olifer V.G., Olifer N.A. *Komp'yuternyye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* (Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols), St. Petersburg, 2010, 943 p. (in Russ.)
2. Karakus M., Durresi A. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, vol. 80, pp. 200–218.
3. Perepelkin D.A., Byshov V.S. *Radioengineering*, 2016, no. 11, pp. 111–119. (in Russ.)
4. Nikishin K.I. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii* (Herald of Computer and Information Technologies), 2015, no. 10, pp. 32–37. (in Russ.)
5. Nikishin K., Konnov N. *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2020, pp. 1–5, DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.
6. Nikishin K., Konnov N., Pashchenko D. *Springer Information Technologies and Mathematical Modelling – Queueing Theory and Applications*, 2017, vol. 638, ser. Communications in Computer and Information Science, pp. 303–314.

7. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, no. 2(38), pp. 69–74.
8. Shalimov A. et al. *Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia*, ACM, 2013.
9. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. *Computer Networks*, 2014, vol. 61, pp. 151–175.
10. Maniu R. and Dumitru L.A. *Scientific Bulletin „Mircea cel Batran" Naval Academy*, 2015, no. 1(18), pp. 58–61.
11. Perepelkin D.A. *Information Technologies* (Informacionnye Tehnologii), 2015, no. 8(21), pp. 602–610. (in Russ.)
12. Ren H., Li X., Geng J. *IEEE International Conference on Cyber‐Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC)*, Chengdu, China, 2016, DOI: 10.1109/CyberC.2016.103.
13. Mekhanov V.B., Kizilov E.A. *Novyye informatsionnyye tekhnologii i sistemy* (New Information Technologies and Systems), Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference, Part 1, Penza, 2010, pp. 67–73. (in Russ.)
14. Kizilov E., Konnov N., Nikishin K., Pashchenko D., Trokoz D. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 44, pp. 01011-p.1–01011-p. 5.
15. Kizilov E.A., Konnov N.N., Mekhanov V.B., Nikishin K.I. *Telematika-2014* (Telematics-2014), Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Methodological Conference, St. Petersburg, 2014, pp. 134–136. (in Russ.)
16. Nikishin K.I., Konnov N.N., Gurin E.I. *University proceedings. Volga region. Technical sciences*, 2018, no. 4, pp. 28–38. (in Russ.)
17. Jensen K., Kristensen L.M. *Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems*, Berlin, Springer, 2009, 384 p.
18. Nikishin K.I., Konnov N.N. *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, 2016, no. 1(17), pp. 299–307. (in Russ.)
19. Nikishin K.I. *Vestnik of Ryazan State Radioengineering University*, 2022, no. 80, pp. 67–74, DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-67-74. (in Russ.)
20. Nikishin K.I. *Vestnik of Ryazan State Radioengineering University*, 2022, no. 80, pp. 75–83, DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-75-83. (in Russ.)
21. Nikishin K.I. *Vestnik of Ryazan State Radioengineering University*, 2022, no. 81, pp. 32–41, DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-32-41. (in Russ.)
22. Nikishin K.I. *Vestnik of Ryazan State Radioengineering University*, 2022, no. 81, pp. 42–50, DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-42-50. (in Russ.)
23. Nikishin K.I. *Saint Petersburg Electrotechnical University Journal*, 2023, no. 1(16), pp. 53–65, DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-53-65. (in Russ.)
24. Nikishin K.I. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2022, no. 2(54), pp. 47–60, DOI: 10.25686/2306-2819.2022.2.4. (in Russ.)

Data on author

Kirill I. Nikishin — PhD; Penza State University, Department of Computer Science; Associate professor; E-mail: nkipnz@mail.ru

Received 28.10.22; approved after reviewing 05.12.22; accepted for publication 28.02.23.

УДК 004.032.26
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-297-305

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРИЕНТАЦИИ ОРБИТАЛЬНОГО ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ РОБОТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

А. А. САСУНКЕВИЧ

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

Аннотация. Рассмотрена задача оценивания параметров ориентации космического аппарата, наблюдаемого с борта космического робота, представлены различные подходы к ее решению. Приведены результаты исследования точности двух подходов к оцениванию параметров ориентации космического аппарата с использованием методов технического зрения по результатам наблюдения космического робота с использованием сверточных нейронных сетей. В первом подходе нейронная сеть применяется для определения экранных координат проекций особых точек объекта на изображении. Второй подход основан на использовании обученной сверточной нейронной сети, которая по наблюдаемому изображению выдает непосредственно углы Эйлера.

Ключевые слова: *космический робот, некооперируемый космический аппарат, техническое зрение, ориентация, сверточные нейронные сети*

Ссылка для цитирования: *Сасункевич А. А.* Оценивание параметров ориентации орбитального объекта по результатам наблюдения космическим роботом с использованием алгоритмов технического зрения // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 297—305. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-297-305.

ESTIMATION OF ORBITAL OBJECT ORIENTATION PARAMETERS BASED ON RESULTS OF SPACE ROBOT OBSERVATION USING MACHINE VISION ALGORITHMS

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

Abstract. The problem of estimating the orientation parameters of a spacecraft observed from a space robot is considered, and various approaches to its solution are presented. Results of the study of the accuracy of two approaches to estimating the parameters of the spacecraft orientation from results of a space robot observation using the technical vision methods and convolutional neural networks, are presented. In the first approach, the neural network is used to determine the screen coordinates of the object's special points projections in the image. The second approach is based on the use of a trained convolutional neural network, which directly generates the Euler angles from the observed image.

Keywords: space robot, uncooperative spacecraft, machine vision, orientation, convolutional neural networks

For citation: Sasunkevich A. A. Estimation of orbital object orientation parameters based on results of space robot observation using machine vision algorithms. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 297—305 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-297-305.

Введение. Развитие технологий микроэлектроники, робототехники и искусственного интеллекта способствует реализации задач сервисного обслуживания некооперируемых космических аппаратов (НКА). Под некооперируемыми понимаются космические аппараты (КА), с которыми невозможен взаимный обмен информацией, обеспечивающей решение задач сближения, стыковки или выполнение других маневров группового полета (подлета,

© *Сасункевич А. А., 2023*

зависания, облета). Сервисное обслуживание НКА возможно на основе решения ряда сложных нетривиальных задач, связанных с маневрированием в окрестности НКА.

Разработке сервисных космических роботов (КР) уделяют должное внимание как в России, так и за рубежом. В настоящее время проведен ряд космических экспериментов по отработке технологии сближения, дозаправки, замены вычислительных модулей КА. Первым примером успешного эксперимента является запуск орбитальной системы „*Orbital Express*“, включающей два КА „*Astra*“ и „*Nextsat*“ [1, 2]. Практическое использование технологии сервисного обслуживания космических средств на орбите подтверждено применением КА „*MEV-1*“ и „*MEV-2*“ [3], которые осуществили стыковки с двумя КА на геостационарной орбите с израсходованными запасами рабочего тела для продления до пяти лет сроков их активного существования путем реализации функции „космического буксира“.

Для обслуживания КА, особенно некооперируемых, в бортовом комплексе управления КР должна находиться информация о взаимном положении и ориентации КА относительно КР [4]. Одним из способов получения этой информации является применение в современных образцах космической техники технологии компьютерного зрения, которая относится к области искусственного интеллекта, связанной с анализом изображений наблюдаемого КА.

В основе технологии компьютерного зрения лежат методы реконструкции трехмерной сцены (*Perspective-n-points, PnP*) [5—7], с помощью которых по перспективной проекции объекта на плоскость сенсора камеры определяется положение объекта в трехмерном пространстве.

Для решения задачи этими методами на изображении фиксируются особые точки, которые соответствуют точкам объекта с известными координатами. При выявлении особых точек на изображении применяются алгоритмы выделения следующих признаков: признаки масштабно-инвариантного преобразования (*scale-invariant feature transform, SIFT*) [8], ускоренные устойчивые признаки (*speeded-up robust features, SURF*) [9], ориентированные устойчивые бинарные признаки (*oriented robust binary features, ORB*) [10] и другие. Альтернативным вариантом выделения особых точек на изображении является использование искусственных нейронных сетей (НС).

Целью настоящей статьи является оценивание параметров ориентации КА с известной геометрией по результатам наблюдения при помощи бортовых средств КР. Исследована точность определения параметров ориентации наблюдаемого объекта с использованием методов PnP по особым точкам, выделяемым НС, а также с использованием НС.

Постановка задачи. Задача оценивания ориентации наблюдаемого объекта по изображению разделяется на два этапа:

1) выделение особых точек изображения объекта, которые могут быть однозначно определены при его поворотах и перемещениях;

2) оценивание вектора перемещения и матрицы поворота объекта с использованием трехмерных координат нескольких точек объекта в связанной с ним системе координат и проекций этих же точек на изображении, получаемом с помощью камеры. Эта задача решается с использованием алгоритмов трехмерной реконструкции PnP.

Рассмотрим два подхода к оцениванию ориентации объекта с использованием НС, их суть поясняет схема, представленная на рис. 1, где введены следующие обозначения: $\left(u_i^*, v_i^*\right)^{\mathrm{T}}$, $i \in \overline{1,8}$ — экранные координаты проекций вершин параллелепипеда, описывающего объект и жестко связанного с ним; $\left(x_i, y_i, z_i\right)^{\mathrm{T}}, i \in \overline{1,8}$ — пространственные координаты вершин описывающего КА параллелепипеда; $\left(X, Y, Z\right)^{\mathrm{T}}$ — положение КА в системе координат

камеры наблюдателя; $\{\gamma, \psi, \vartheta\}$ — ориентация КА, определенная методом PnP; $\{\gamma^*, \psi^*, \vartheta^*\}$ — ориентация КА, определенная НС.

На начальном этапе задается архитектура сверточной НС (СНС). Затем генерируется обучающая выборка, которая может представлять собой фотографии интересующего объекта в различных ракурсах либо синтезированные изображения модели объекта, полученные с помощью программы редактора трехмерных моделей. Для первого подхода к решению задачи оценивания ориентации наблюдаемого КА каждой фотографии либо изображению ставится в соответствие матрица размерностью 8×2, строки которой представляют собой экранные координаты $\left(u_i^*, v_i^*\right)^{\mathrm{T}}$, $i \in \overline{1,8}$, проекций вершин параллелепипеда, описывающего объект и жестко связанного с ним (рис. 1).

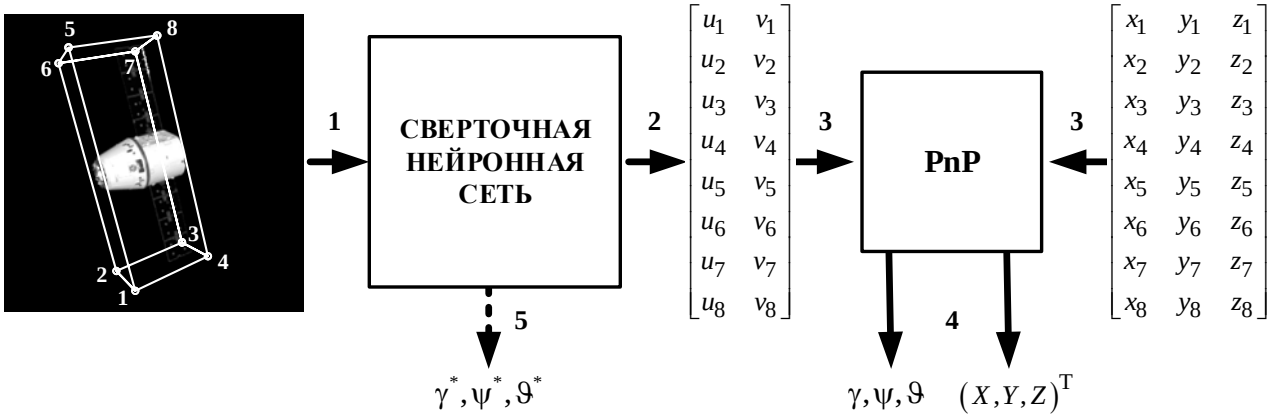


Рис. 1

Далее СНС обучается на подготовленных парах „изображение КА—экранные координаты $\left(u_i^*, v_i^*\right)^{\mathrm{T}}$, $i \in \overline{1,8}$“. В дальнейшем при подаче на вход СНС изображения наблюдаемого КА (шаг 1, рис. 1) на ее выходе формируются экранные координаты $\left(u_i^*, v_i^*\right)^{\mathrm{T}}$, $i \in \overline{1,8}$, вершин описывающего параллелепипеда (шаг 2, рис. 1).

Преимуществом применения СНС для выделения особых точек на изображении является устойчивость к изменениям освещенности и однородности текстуры объекта, а к недостаткам — необходимость обучения и возможность ее применения только на одном объекте.

В дальнейшем по определенным экранным координатам $\left(u_i^*, v_i^*\right)^{\mathrm{T}}$, $i \in \overline{1,8}$, проекций вершин параллелепипеда на изображении и известным трехмерным координатам $\left(x_i, y_i, z_i\right)^{\mathrm{T}}, i \in \overline{1,8}$, этих же вершин в связанной с КА системе координат (шаг 3, рис. 1) с применением алгоритмов PnP определяются положение $\left(X, Y, Z\right)^{\mathrm{T}}$ и ориентация $\{\gamma, \psi, \vartheta\}$ КА в системе координат камеры наблюдателя (шаг 4, рис. 1).

Второй подход к оцениванию ориентации КА состоит в следующем. Формируемая СНС обучается на наборе изображений КА с различной ориентацией, а в качестве выходного результата возвращает значения углов Эйлера, соответствующих ориентации КА на изображении. В этом случае оценивание ориентации КА включает подачу его изображения на вход СНС и получение решения в виде углов Эйлера $\left\{\gamma^*, \psi^*, \vartheta^*\right\}$ (шаги 1 и 5, рис. 1).

Для того чтобы установить точность оценивания параметров ориентации наблюдаемого КА при использовании рассмотренных подходов, выполнены следующие операции:

— подготовка исходных данных для обучения СНС;

— формирование и обучение СНС;

— расчет показателей точности определения параметров ориентации наблюдаемого КА.

Подготовка исходных данных для обучения СНС. В качестве объекта наблюдения при проведении исследований использована трехмерная модель КА „*Space Dragon*“. Обучающая выборка создана с использованием открытого трехмерного редактора *Blender*.

Методика формирования обучающей выборки включает следующие этапы.

1. В трехмерном редакторе задается случайная ориентация КА в определенном диапазоне значений углов Эйлера.

2. Заданная ориентация изображения КА не изменяется.

3. В отдельном файле сохраняются соответствующие изображению пространственные координаты вершин описывающего КА параллелепипеда $\left(x_i, y_i, z_i\right)^{\mathrm{T}}, i \in \overline{1,8}$, экранные координаты проекций вершин параллелепипеда $\left(u_i^*, v_i^*\right)^{\mathrm{T}}, i \in \overline{1,8}$, и параметры ориентации КА в виде углов Эйлера $\{\gamma, \psi, \vartheta\}$.

Выполнение перечисленных операций автоматизировано при помощи разработанного скрипта на языке *Phyton*, интерпретатор которого встроен в трехмерный редактор *Blender*.

Значения углов Эйлера, определяющих ориентацию КА, заданы случайными равномерно распределенными в диапазоне $\varphi \in [-30°, +30°]$, где $\varphi \in \{\gamma, \psi, \vartheta\}$. Расстояние до КА принято постоянным и выбрано так, чтобы при различной ориентации КА занимал максимальное пространство изображения. Введено допущение о сохранении условиях освещения КА. Примеры сформированных изображений КА приведены на рис. 2.

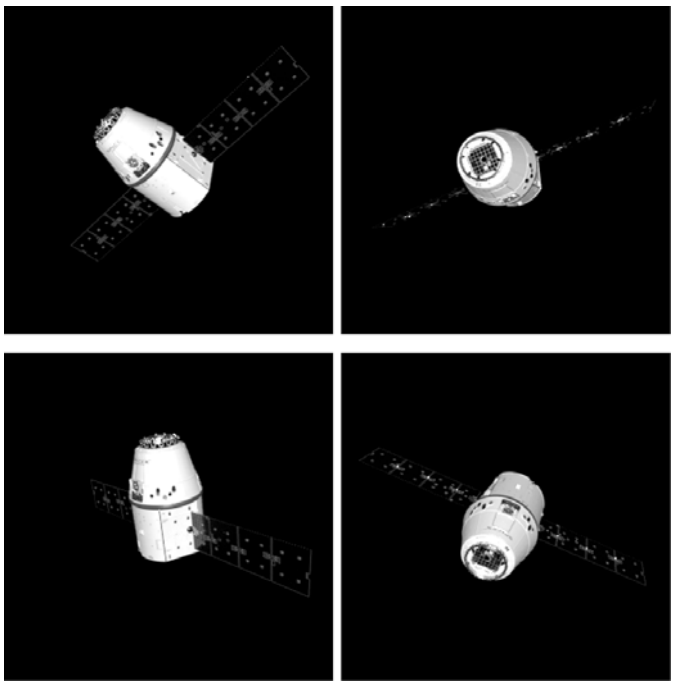


Рис. 2

Формирование и обучение СНС. Структура СНС содержит три сверточных слоя, слои прореживания по максимуму, слои нормализации по выборке и с отбрасыванием связей, полносвязные слои. Отличительная особенность структур СНС для определения ориентации наблюдаемого КА с помощью исследуемых подходов состоит в последнем слое, определяющем количество выдаваемых параметров.

На выходе СНС, в которой реализован первый подход к определению ориентации КА, создана матрица 8×2, каждая строка которой содержит экранные координаты проекции вершины описывающего КА параллелепипеда $(u_i, v_i)^{\mathrm{T}}, i \in \overline{1,8}$. Архитектура этой СНС представлена на рис. 3.

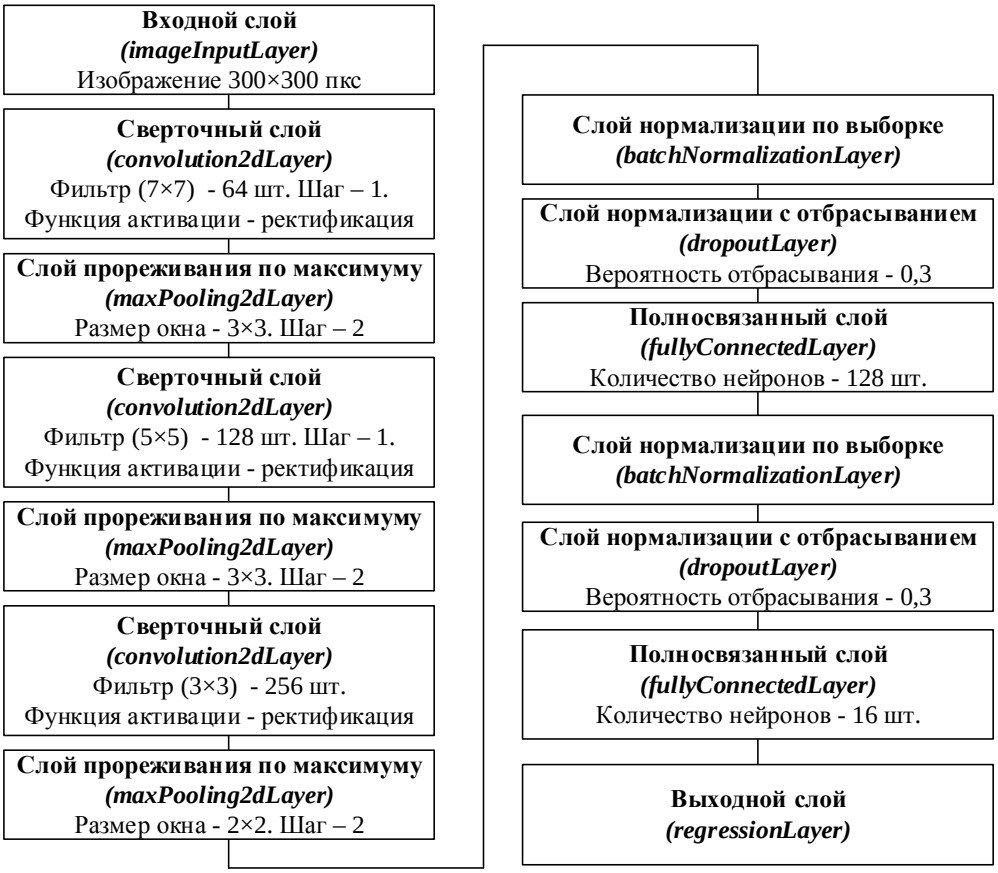


Рис. 3

Последний полносвязный слой СНС для решения задачи с помощью второго подхода содержит три искусственных нейрона (по числу углов Эйлера).

В качестве входного сигнала сформированной для исследования СНС выбрано изображение размером 300×300 пикселов в градациях серого цвета. Обучение обеих СНС проведено на 8000 изображений в течение 10 эпох.

Расчет показателей точности определения параметров ориентации наблюдаемого КА. Для расчета использованы 1000 тестовых изображений КА с различной ориентацией, поступающих на вход СНС. На выходе СНС получены с некоторой погрешностью экранные координаты проекций восьми вершин описывающего КА параллелепипеда.

На рис. 4 приведено одно из изображений, где сплошной линией выделен истинный описывающий параллелепипед, а пунктиром — параллелепипед, вершины которого определены с помощью СНС. Погрешность определения экранных координат проекций вершин описывающего КА параллелепипеда характеризует точность определения ориентации КА.

В проведенных исследованиях получены оценки показателей точности параметров ориентации КА с использованием алгоритма трехмерной реконструкции PnP как при использовании истинных координат вершин параллелепипеда, так и координат, выделенных с помощью СНС.

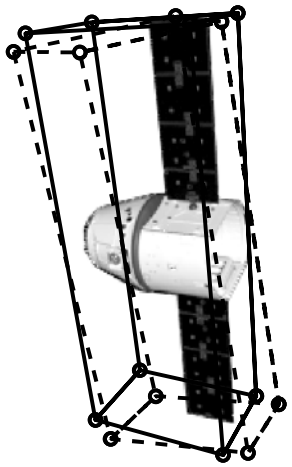


Рис. 4

Результаты исследования представлены в виде гистограмм (рис. 5—7), на которых черным цветом выделены 95 % всех данных, а также указаны: μ — среднее значение, $\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$; σ — среднее квадратическое отклонение, $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left|x_i - \mu\right|^2}$; m — максимальное по модулю значение, $m = \max\left|x_i\right|$; x_i — i-я реализация случайной величины; n — количество значений случайной величины.

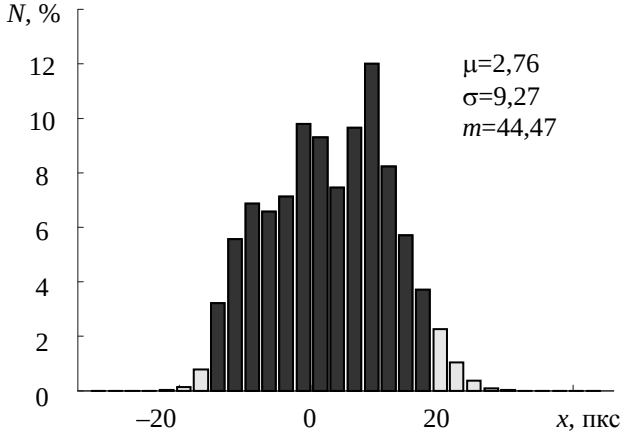


Рис. 5

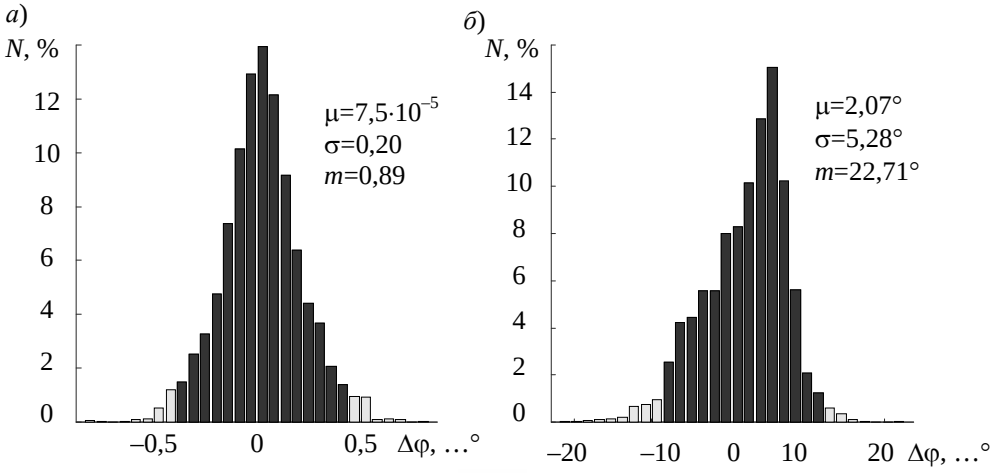


Рис. 6

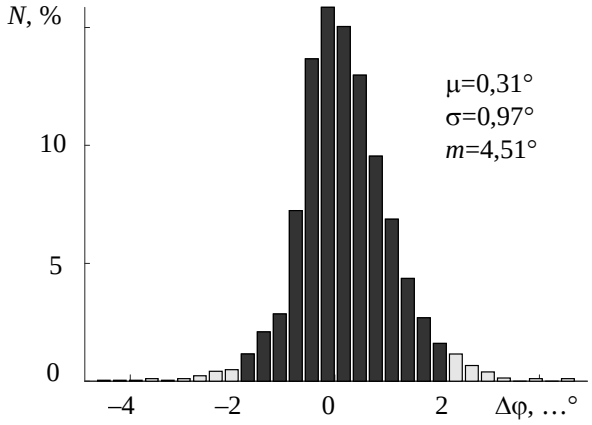


Рис. 7

На рис. 5 приведена гистограмма погрешностей Δx определения экранных координат проекций вершин описывающего КА параллелепипеда для всех тестовых изображений, где $\Delta x = x_{\text{НС}} - x$; $x_{\text{НС}}$ — координата особой точки, определенная СНС; x — истинная координата особой точки на изображении; $x \in \{u, \nu\}$. Из рис. 5 видно, что погрешность определения экранной координаты проекции вершины параллелепипеда с использованием СНС находится в пределах ± 20 пикселов изображения.

На рис. 6 приведены гистограммы погрешностей $\Delta\varphi$ определения ориентации наблюдаемого КА методом PnP с использованием точных экранных координат проекций вершин описывающего КА параллелепипеда (*а*) и координат, определенных СНС (*б*). Здесь и далее φ^* — определенный рассматриваемыми подходами угол Эйлера, соответствующий ориентации КА; φ — истинное значение угла Эйлера: $\varphi \in \{\gamma, \psi, \vartheta\}$.

Анализ результатов, приведенных на рис. 6, показывает, что при известных истинных экранных координатах проекций вершин описывающего КА параллелепипеда метод трехмерной реконструкции PnP позволяет определить ориентацию наблюдаемого объекта с погрешностью до $\pm 1°$.

В случае использования определенных СНС экранных координат проекций вершин описывающего КА параллелепипеда и метода PnP погрешность определения ориентации наблюдаемого объекта не превышает $\pm 15°$.

Как следует из гистограммы, представленной на рис. 7, погрешность $\Delta\varphi$ определения параметров ориентации наблюдаемого КА с помощью второго подхода, находится в пределах $\pm 3°$.

На рис. 8 приведена зависимость среднего квадратического отклонения погрешностей определения углов Эйлера от истинных значений углов ориентации. Анализ представленных результатов показывает, что наибольшие погрешности определения параметров ориентации наблюдаются на границах диапазона значений углов Эйлера, на котором происходило обучение СНС. Определение причин роста погрешностей требует проведения отдельных исследований.

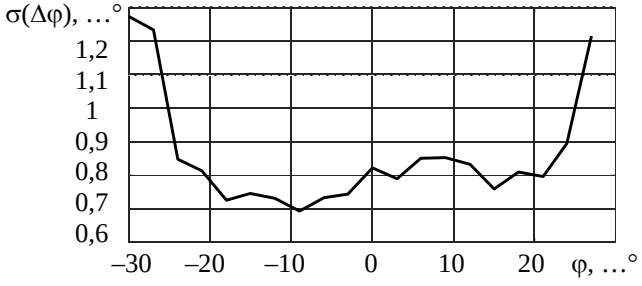


Рис. 8

Заключение. В работе исследованы два подхода к оцениванию точности ориентации КА по результатам наблюдения КР с использованием СНС.

В первом подходе СНС применяется для определения экранных координат проекций особых точек объекта на изображении. Используя полученную информацию с помощью методов PnP, возможно грубо оценить ориентацию наблюдаемого КА с погрешностью до $\pm 15°$. В случае выделения точных экранных координат проекций особых точек объекта иными способами методы PnP позволяют определить ориентацию объекта с погрешностью до $\pm 1°$.

Другой подход к оцениванию параметров ориентации наблюдаемого КА, основанный на использовании обученной СНС, которая по наблюдаемому изображению выдает непосредственно углы Эйлера, позволяет их определить с погрешностью до $\pm 3°$.

В целях развития второго подхода оценивания параметров ориентации наблюдаемого объекта с помощью СНС в дальнейшем необходимо провести исследования его применимости в случаях изменения условий освещенности и расстояния до наблюдаемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Черный И. В.* Запущен спутник контроля космической обстановки // Новости космонавтики. 2010. № 11. С. 34—36.
2. *Wilson J. R.* Satellite hopes ride on Orbital Express // Aerospace America. 2007. P. 30—35.
3. MEV-1 (Mission Extension Vehicle-1) and MEV-2 [Электронный ресурс]: <http://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mev-1>. (дата обращения: 30.05.2022).
4. *Степанов Д. Н., Бахшиев А. В., Смирнова Е. Ю., Половко С. А.* Определение положения космических аппаратов путем обнаружения и сопровождения естественных конструктивных особенностей с использованием существующих телевизионных камер // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2016. № 1. С. 61—77.
5. *Kanaeva E., Gurevich L., Vakhitov A.* Camera pose and focal length estimation using regularized distance constraints // Proc. of the British Machine Vision Conf. (BMVC). 2015. P. 162.1—162.12.
6. *Lepetit V., Moreno-Noguer F., Fua P.* Epnp: Anaccurate o(n) solution to the pnp problem // Intern. Journal of Computer Vision. 2009. Vol. 81, N 2. P. 155—166.
7. *Yinqiang Zheng, Satoshi Sugimoto, Imari Sato, Masatoshi Okutomi.* A general and simple method for camera pose and focal length determination // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2014. P. 430—437. DOI: 10.1109/CVPR.2014.62.
8. *Lowe D. C.* Object recognition from local scale-invariant features // Proc. Intern. Conf. Computer Vision. 1999. Vol. 2. P. 1150—1157.
9. *Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.* SURF: Speeded up robust features // Computer Vision Image Understanding. 2008. Vol. 110. P. 346—359.
10. *Rublee E., Rabaund V., Konolige K., Bradski G.* ORB: An efficient alternative to SIRF or SURF // Proc. Intern. Conf. Computer Vision. 2011. P. 2564—2571.

Сведения об авторе

Александр Анатольевич Сасункевич — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; докторант; E-mail: saa-soso@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.10.22; одобрена после рецензирования 03.11.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Cherny I.V. *Novosti kosmonavtiki* (Space News), 2010, no. 11, pp. 34–36. (in Russ.)
2. Wilson J.R. *Aerospace America*, 2007, pp. 30–35.
3. *MEV-1 (Mission Extension Vehicle–1) and MEV-2,* http://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mev-1.
4. Stepanov D.N., Bakhshiyev A.V., Smirnova E.Yu., Polovko S.A. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2016, no. 1, pp. 61–77. (in Russ.)

5. Kanaeva E., Gurevich L., Vakhitov A. Proc. of the British Machine Vision Conference (BMVC), 2015, pp. 162.1–162.12.
6. Lepetit V., Moreno-Noguer F., Fua P. *Intern. Journal of Computer Vision*, 2009, no. 2(81), pp. 155–166.
7. Yinqiang Zheng, Satoshi Sugimoto, Imari Sato, Masatoshi Okutomi, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 430–437, DOI: 10.1109/CVPR.2014.62
8. Lowe D.C. *Proc. Intern. Conf. Computer Vision*, 1999, vol. 2, pp. 1150–1157.
9. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. *Computer Vision Image Understanding,* 2008, vol. 110, pp. 346–359.
10. Rublee E., Rabaund V., Konolige K., Bradski G. *Proc. Intern. Conf. Computer Vision*, 2011, pp. 2564–2571.

Data on author

Alexander A. Sasunkevich — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; Doctoral Student; E-mail: saa-soso@rambler.ru

Received 25.10.22; approved after reviewing 03.11.22; accepted for publication 28.02.23.

УДК 53.043; 53.082; 544.252.24
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-306-312

МЕТОД ОПТИЧЕСКОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ХИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР В ФОТОАКТИВНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ

Д. Д. Дарморо[*], А. О. Пивень, Т. Орлова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
[*] *darmoroz@infochemistry.ru*

Аннотация. Проанализированы метод создания оптической схемы и принцип использования фотоактивных образцов хиральных нематических жидких кристаллов для оптической молекулярной генерации локализованных хиральных структур. Показано, что в зависимости от мощности лазерного УФ-пучка возможно существование двух различных статичных локализованных хиральных структур размером порядка 25 и 10 мкм. Показаны процессы реконфигурации локализованных хиральных жидкокристаллических структур друг в друга и в полностью фрустрированное состояние пленки хирального нематического жидкого кристалла. Эти локализованные структуры могут применяться в качестве миниатюризированных перестраиваемых оптических элементов для фокусировки и структурирования проходящих световых пучков.

Ключевые слова: *нематический жидкий кристалл, светопоглощающая хиральная молекулярная добавка, оптическая схема, статичная локализованная хиральная структура, перестройка поля директора*

Благодарности: авторы благодарят Prof. Etienne Brasselet (University of Bordeaux, France), Dr. Supitchaya Iamsaard, Dr. Federico Lancia и Prof. Nathalie Katsonis (Stratingh Institute for Chemistry, University of Groningen, The Netherlands) за приготовление смесей фотоактивных хиральных нематических жидких кристаллов и предоставленные жидкокристаллические образцы.

Ссылка для цитирования: *Дарморо Д. Д., Пивень А. О., Орлова Т.* Метод оптической молекулярной генерации локализованных хиральных структур в фотоактивных жидкокристаллических пленках // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 306—312. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-306-312.

METHOD FOR OPTICAL MOLECULAR GENERATION OF LOCALIZED CHIRAL STRUCTURES IN PHOTOACTIVE LIQUID CRYSTAL FILMS

D. D. Darmoroz[*], A. O. Piven, T. Orlova

ITMO University, St. Petersburg, Russia
[*] *darmoroz@infochemistry.ru*

Abstract. A method for creating an optical scheme and the principle of using photoactive samples of chiral nematic liquid crystals for optical molecular generation of localized chiral structures are considered. It is shown that the existence of two different static localized chiral structures with sizes of about 25 and 10 μm is possible, depending on the power of the UV laser beam. The processes of reconfiguration of localized chiral liquid crystal structures into each other and into a completely frustrated state of a chiral nematic liquid crystal film are described. These localized structures can be used as miniaturized tunable optical elements for focusing and structuring transmitted light beams.

Keywords: nematic liquid crystal, light-absorbing chiral molecular additive, optical scheme, static localized chiral structure, director field restructuring

© *Дарморо Д. Д., Пивень А. О., Орлова Т., 2023*

Acknowledments: The authors thank Prof. Etienne Brasselet (University of Bordeaux, France), Dr. Supitchaya Iamsaard, Dr. Federico Lancia and Prof. Nathalie Katsonis (Stratingh Institute for Chemistry, University of Groningen, The Netherlands) for preparation of photoactive chiral nematic liquid crystal mixtures and provided liquid crystal samples.

For citation: Darmoroz D. D., Piven A. O., Orlova T. Method for optical molecular generation of localized chiral structures in photoactive liquid crystal films. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 306—312 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-306-312.

Введение. Локализованные хиральные жидкокристаллические (ЖК) структуры успешно зарекомендовали себя в качестве одиночных микроразмерных оптических элементов [1—3], составных элементов дифракционной оптики [4] и транспортных микромашин [5—7]. Первые методы генерации таких структур (также известных как „холестерические сферулиты“) были основаны на кратковременном приложении переменного электрического поля к фрустрированным пленкам хиральных нематических жидких кристаллов [8, 9]. Эти методы позволяли формировать целые ансамбли сферулитов в ЖК-образце, но не обеспечивали индивидуальный контроль их местоположения. Только с развитием методов оптической генерации стало возможным управлять как положением хиральных микроструктур в ЖК-пленке, так и их супрамолекулярной архитектурой [4, 10]. Однако метод оптически индуцированной локальной переориентации молекул в объеме жидкого кристалла требует достаточно большой мощности падающего лазерного пучка вплоть до сотен милливатт для генерации одной локализованной структуры [11, 12]. Это делает практически невозможным массовое изготовление композитных оптических элементов, состоящих из набора локализованных ЖК-структур: параллельная генерация потребовала бы мощностей лазерного пучка порядка нескольких ватт и выше, а последовательная занимала бы слишком много времени.

Модифицированный метод оптической молекулярной генерации позволяет, во-первых, создавать локализованные структуры в фотоактивных хиральных нематиках при мощности падающего светового пучка всего в десятки и даже единицы нановатт, и, во-вторых, обеспечивает генерацию не только статичных, но и динамических хиральных микроструктур [13, 14].

В настоящей работе проанализирован метод создания оптической схемы на основе УФ-лазера для оптической молекулярной генерации локализованных хиральных ЖК-структур и продемонстрирована зависимость различных типов микроструктур от мощности светового пучка.

Подготовка ЖК-образцов и создание оптической схемы. Метод оптической молекулярной генерации основан на использовании тонких пленок фрустрированных фотоактивных хиральных нематиков как матрицы, в которой будут создаваться локализованные хиральные структуры. Фотоактивный хиральный нематический жидкий кристалл создается допированием нематической матрицы светопоглощающей хиральной молекулярной добавкой. Благодаря закручивающей способности хиральной примеси молекулы жидкого кристалла формируют супрамолекулярную геликоидальную структуру с шагом спирали p_1 (рис. 1), т.е. хиральную нематическую (холестерическую) ЖК-фазу. При освещении хирального нематика в полосе поглощения молекулярной добавки происходит ее фотоизомеризация с перестройкой молекулярной структуры, и, как следствие, изменением закручивающей способности. В результате шаг супрамолекулярной спирали изменяется от p_1 к p_2. В этом заключается принцип управления шагом спирали хирального нематика с помощью молекулярных фотопереключателей [15].

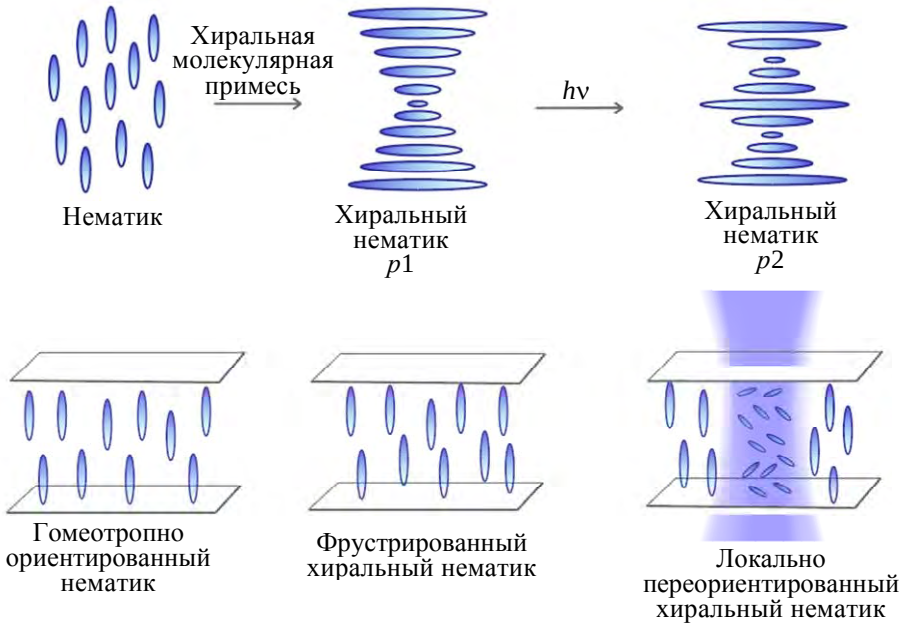


Рис. 1

В том случае, когда нематический кристалл заправляется в ЖК-ячейку с гомеотропными граничными условиями, все его молекулы выстраиваются перпендикулярно подложкам образца (рис. 1). Если вместо нематического кристалла в такую ячейку заправляется хиральный нематик, в общем случае в образце наблюдается так называемая текстура „отпечатков пальцев“ [16]. Однако при определенном соотношении толщины образца и шага спирали хирального нематика (определяемого упругими константами жидкого кристалла; в большинстве случаев это соотношение ~1), геликоидальная супрамолекулярная структура оказывается подавленной, т.е. находится в раскрученном (фрустрированном) состоянии. Если шаг спирали уменьшается, например, при освещении фотоактивного жидкого кристалла, супрамолекулярная структура снова становится хиральной. При локальном освещении пленки фрустрированного хирального нематика в ней таким способом можно сформировать локализованные хиральные структуры.

В настоящей работе использовались светоуправляемые образцы хирального нематика, основанные на нематическом кристалле E7 (Merck), допированном фотоактивными молекулярными моторами. Такие образцы с начальным шагом холестерической спирали p_1 = +16 мкм и светоиндуцированным p_2 = –1,7 мкм успешно зарекомендовали себя при генерации локализованных хиральных структур [13, 14]. Фотоизомеризация молекулярных моторов индуцируется светом в ближнем УФ-диапазоне, поскольку использованные молекулярные моторы имеют максимум поглощения в области 365 нм [13].

В оптической установке для генерации локализованных хиральных структур контролируются такие параметры записывающего светового пучка, как интенсивность и диаметр пятна на образце, а также отсутствие общей засветки ЖК-образца в синем и УФ-диапазоне.

Для контроля мощности записывающего УФ-пучка используется следующая последовательность оптических элементов (рис. 2). Полуволновая пластина λ/2 поворачивает плоскость поляризации лазерного светового пучка (λ = 375 нм), далее призма Волластона WP делит линейный поляризованный свет с произвольным направлением оси поляризации на два ортогонально поляризованных выходных пучка. Эта комбинация элементов позволяет варьировать соотношение мощностей двух пучков после призмы Волластона и, в случае необходимости, использовать второй световой пучок для создания дополнительных условий генерации структур. В рассматриваемой схеме второй пучок был перекрыт. Установленный после призмы нейтральный оптический фильтр NDF дополнительно уменьшает мощность записывающего

УФ-пучка. Поглощающий нейтральный фильтр использовался во избежание обратного рассеяния УФ-света от передней грани.

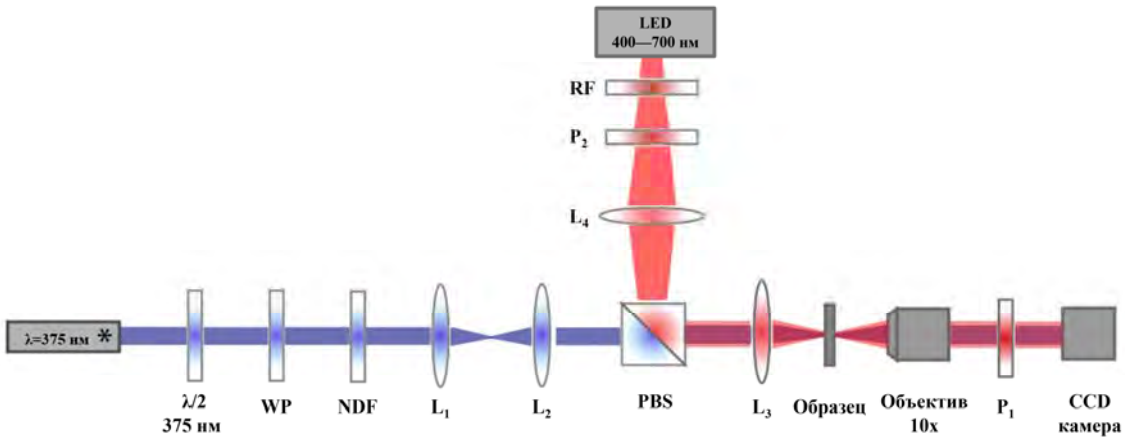


Рис. 2

Светоуправляемые образцы хирального нематика с примесью молекулярных моторов крайне чувствительны к освещению ультрафиолетом: всего 10—50 нВт мощности лазерного УФ-пучка достаточно для формирования локализованных хиральных структур [13, 14]. Поэтому для проведения измерений оптическая установка размещается в темной комнате, а мощность светового пучка, падающего на образец, контролируется с помощью прецизионного фотодиодного датчика мощности. Современные датчики позволяют регистрировать мощность световых пучков начиная с 500 пВт.

Диаметр светового УФ-пятна контролируется при помощи телескопа из линз L_1 и L_2 и линзы L_3, фокусирующей свет на образце. Как правило, образец ставится в фокус или близко к фокусу линзы L_3. Для подбора комбинации линз производится расчет исходя из диаметра светового пучка на выходе лазера и требуемого размера пятна на образце, который выбирается равным толщине ЖК-ячейки (в нашем случае 10 мкм) [11]. Как правило, в результате подбора линз диаметр УФ-пучка в фокусе L_3 оказывается порядка 8,5—9,5 мкм, и поэтому ЖК-образец устанавливается за фокусом.

Поскольку основной изомер и фотоизомер молекулярного мотора поглощают вплоть до 500—530 нм [13], для визуализации оптической текстуры ЖК-образца после источника белого света (LED) устанавливается красный фильтр RF с широкой полосой пропускания начиная от 570—600 нм. Поляризатор P_2 формирует линейно поляризованный широкий световой пучок, а линза L_4 коллимирует его. Поляризационный кубик PBS сводит вместе записывающий УФ-пучок и пучок подсветки образца, а также дополнительно уменьшает мощность УФ-света.

Длиннофокусный объектив с 10-кратным увеличением позволяет в режиме реального времени отслеживать УФ-индуцированную переориентацию хирального нематика, проецируя изображение образца на CCD-камеру. Перед камерой устанавливается поляризатор P_1 для наблюдения кристалла в условиях скрещенных поляризаторов. В отсутствие ЖК-образца камера должна регистрировать темное изображение с минимумом интенсивности пикселов (как правило, 10—20 из 256 уровней интенсивности 8-битной камеры).

Важной задачей является позиционирование ЖК-образца относительно фокуса линзы L_3. Для этого образец, установленный на микрометрической подвижке, смещают вдоль оптической оси и регистрируют время переориентации хирального нематика, соответствующее появлению светлой области в поле зрения камеры. Минимальное время переориентации означает, что пленка хирального жидкого кристалла находится в фокусе линзы L_3. После этого рассчитывается расстояние z от положения фокуса до положения, при котором диаметр пучка равен 10 мкм, и образец отодвигается от фокуса на рассчитанное расстояние.

Результаты эксперимента. Целью эксперимента было определение мощности лазерного УФ-пучка, который обеспечивает существование статичных локализованных структур LS_1 и LS_2. Начальным этапом эксперимента являлось создание динамической локализованной структуры [14]. Затем мощность записывающего пучка каждые 15 минут уменьшалась на 1 нВт. Время ожидания 15 минут соответствует времени достижения локализованными хиральными структурами равновесного состояния. При уменьшении мощности записывающего пучка до 11 нВт наблюдалось формирование статичной локализованной структуры LS_2. С дальнейшим снижением мощности размеры структуры уменьшались, и при достижении порога 7 нВт наблюдалось превращение статичной структуры LS_2 в статичную структуру LS_1. При достижении мощности записывающего пучка 5 нВт статичная локализованная структура LS_1 релаксировала (прекращала свое существование) и хиральный нематический жидкий кристалл переходил во фрустрированное состояние, внешний вид которого не отличался от обычного гомеотропно ориентированного образца.

Вид структур LS_1 и LS_2 в скрещенных поляризаторах представлен на рис. 3 вместе с зависимостью диаметра структуры от мощности светового пучка (шкала — 10 мкм). Небольшой излом кривой соответствует переходу из LS_2 в LS_1, а резкое снижение до нуля, очевидно, соответствует исчезновению структуры LS_1. Таким образом, был определен диапазон существования статичной структуры LS_1 от 6 до 7 нВт. Диапазон существования статичной структуры LS_2 составил от 8 до 11 нВт.

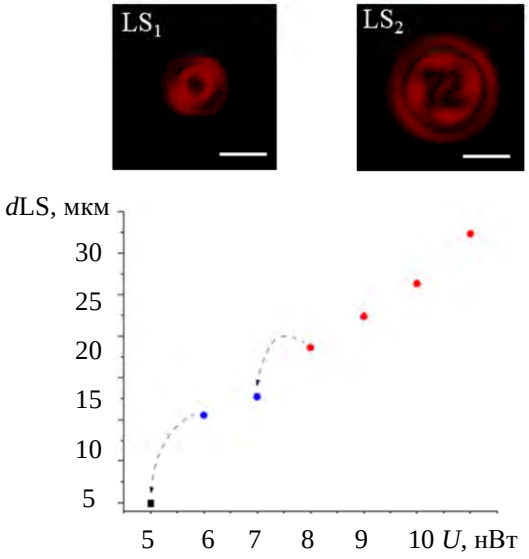


Рис. 3

Трансформации структуры LS_2 в LS_1 при мощности светового пучка 7 нВт и структуры LS_1 во фрустрированное состояние жидкого кристалла при 5 нВт показаны на рис. 4 (шкала — 10 мкм).

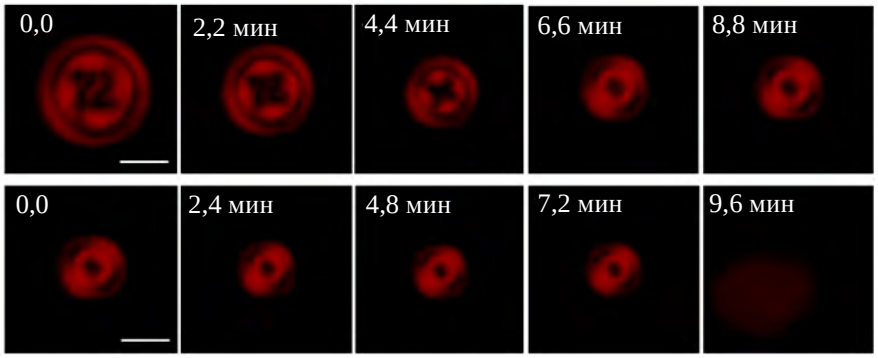


Рис. 4

При первом переходе внешний вид локализованной структуры заметно изменяется, что может свидетельствовать о существенной реконфигурации поля ЖК-директора. При втором переходе внешний вид структуры остается приблизительно постоянным вплоть до ее исчезновения, что означает сохранение трехмерной структуры поля ЖК-директора вплоть до момента фрустрации супрамолекулярной спирали.

Заключение. В настоящей работе рассмотрены принципы подготовки ЖК-образцов фотоактивных хиральных нематиков и методика создания оптической схемы для генерации статичных локализованных хиральных структур размером 10—30 мкм. Определены два диапазона мощности светового УФ-пучка, поддерживающих существование двух различных типов хиральных структур. Также в работе показаны процессы трансформации локализованных хиральных ЖК-структур друг в друга и в полностью фрустрированное состояние пленки хирального нематического жидкого кристалла. Эти локализованные структуры могут применяться в качестве миниатюризированных перестраиваемых оптических элементов для фокусировки и структурирования проходящих световых пучков [2, 3, 17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hamdi R.* et al. Liquid crystal bubbles forming a tunable micro-lenses array // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110, N 7.
2. *Yang B., Brasselet E.* Arbitrary vortex arrays realized from optical winding of frustrated chiral liquid crystals // J. Opt. (United Kingdom). 2013. Vol. 15, N 4. P. 1—5.
3. *Hess A. J.* et al. Control of Light by Topological Solitons in Soft Chiral Birefringent Media // Phys. Rev. X. 2020. Vol. 10, N 3. P. 32—40.
4. *Ackerman P. J., Qi Z., Smalyukh I. I.* Optical generation of crystalline, quasicrystalline, and arbitrary arrays of torons in confined cholesteric liquid crystals for patterning of optical vortices in laser beams // Phys. Rev. E – Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. 2012. Vol. 86, N 2. P. 1—14.
5. *Ackerman P. J.* et al. Plasmon-Exciton Interactions Probed Using Spatial Coentrapment of Nanoparticles by Topological Singularities // ACS Nano. 2015. Vol. 9, N 12. P. 12392—12400.
6. *Evans J. S.* et al. Optical generation, templating, and polymerization of three-dimensional arrays of liquid-crystal defects decorated by plasmonic nanoparticles // Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. 2013. Vol. 87, N 3. P. 1—14.
7. *Sohn H. R. O.* et al. Dynamics of topological solitons, knotted streamlines, and transport of cargo in liquid crystals // Phys. Rev. E. American Physical Society. 2018. Vol. 97, N 5.
8. *Haas W. E. L., Adams J. E.* Electrically variable diffraction in spherulitic liquid crystals // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25, N 5. P. 263—264.
9. *Kawachi M., Kogure O., Kato Y.* Bubble domain texture of a liquid crystal // Jpn. J. Appl. Phys. 1974. Vol. 13. P. 1457. DOI:10.1143/jjap.13.1457.
10. *Ackerman P. J., Smalyukh I. I.* Diversity of knot solitons in liquid crystals manifested by linking of preimages in torons and hopfions // Phys. Rev. X. 2017. Vol. 7, N 1. P. 1—27.
11. *Smalyukh I. I.* et al. Three-dimensional structure and multistable optical switching of triple-twisted particle-like excitations in anisotropic fluids // Nat. Mater. Nature Publishing Group. 2010. Vol. 9, N 2. P. 139—145.
12. *Loussert C., Brasselet E.* Multiple chiral topological states in liquid crystals from unstructured light beams // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104, N 5.
13. *Loussert C.* et al. Subnanowatt Opto-Molecular Generation of Localized Defects in Chiral Liquid Crystals To cite this version // Advanced Material. 2014. Vol. 26. P. 4242—4246.
14. *Orlova T.* et al. Revolving supramolecular chiral structures powered by light in nanomotor-doped liquid crystals // Nat. Nanotechnol. Springer US. 2018. Vol. 13, N 4. P. 304—308.
15. *Kim Y., Tamaoki T.* Photoresponsive Chiral Dopants: Light-Driven Helicity Manipulation in Cholesteric Liquid Crystals for Optical and Mechanical Functions // ChemPhotoChem. 2019. Vol. 3. P. 284—303.

16. *Dierking I.* Textures of Liquid Crystals. John Wiley & Sons, 2003. 233 p.

17. *Papič M.* et al. Topological liquid crystal superstructures as structured light lasers // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2021. Vol. 118, N 49. DOI:10.1073/pnas.2110839118.

Сведения об авторах

Дарина Дмитриевна Дармороз — аспирант; Университет ИТМО, факультет наук о жизни; E-mail: darmoroz@infochemistry.ru

Анастасия Олеговна Пивень — магистрант; Университет ИТМО, факультет наук о жизни; E-mail: piven@infochemistry.ru

Татьяна Орлова — канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО, факультет наук о жизни; вед. научный сотрудник НОЦ инфохимии; E-mail: torlova@itmo.ru

Поступила в редакцию 31.10.22; одобрена после рецензирования 30.11.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Hamdi R. et al. *J. Appl. Phys*., 2011, no. 7(110).
2. Yang B., Brasselet E. *J. Opt. (United Kingdom)*, 2013, no. 4(15), pp. 1–5.
3. Hess A.J. et al. *Phys. Rev. X*, 2020, no. 3(10), pp. 32–40.
4. Ackerman P.J., Qi Z., Smalyukh I.I. *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys*., 2012, no. 2(86), pp. 1–14.
5. Ackerman P.J. et al. *ACS Nano*, 2015, no. 12(9), pp. 12392–12400.
6. Evans J.S. et al. *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys*., 2013, no. 3(87), pp. 1–14.
7. Sohn H.R.O. et al. Phys. Rev. E. *American Physical Society*, 2018, no. 5(97).
8. Haas W.E.L., Adams J.E. *Appl. Phys. Lett*., 1974, no. 5(25), pp. 263–264.
9 Kawachi M., Kogure O., Kato Y. *Jpn. J. Appl. Phys*., 1974, vol. 13, pp. 1457, DOI:10.1143/jjap.13.1457.
10. Ackerman P.J., Smalyukh I.I. *Phys. Rev. X*, 2017, no. 1(7), pp. 1–27.
11. Smalyukh I.I. et al. *Nat. Mater. Nature Publishing Group*, 2010, no. 2(9), pp. 139–145.
12. Loussert C., Brasselet E. *Appl. Phys. Lett*., 2014, no. 5(104).
13. Loussert C. et al. *Advanced Material*, 2014, vol. 26, pp. 4242–4246.
14. Orlova T. et al. Nat. *Nanotechnol*., Springer US, 2018, no. 4(13), pp. 304–308.
15. Kim Y., Tamaoki T. *ChemPhotoChem*., 2019, vol. 3, pp. 284–303.
16. Dierking I. *Textures of Liquid Crystals*, John Wiley & Sons, 2003.
17. Papič M. et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, no. 49(118), DOI:10.1073/pnas.2110839118.

Data on authors

Darina D. Darmoroz — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Life Sciences; E-mail: darmoroz@infochemistry.ru

Anastasiia O. Piven — Master Student; ITMO University, Faculty of Life Sciences; E-mail: piven@infochemistry.ru

Tatiana Orlova — PhD; ITMO University, Faculty of Life Sciences; Infochemistry Scientific Center, Leading Researcher; E-mail: torlova@itmo.ru

Received 31.10.22; approved after reviewing 30.11.22; accepted for publication 28.02.23.

УДК 681.787
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ПРИ РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИИ АПЕРТУР ФОТОПРИЕМНИКОВ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ИНТЕРФЕРОГРАММ

Е. Е. Майоров[*1], А. В. Арефьев[1], Ю. М. Бородянский[2],
Р. Б. Гулиев[3], А. В. Дагаев[4], В. П. Пушкина[1]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
Санкт-Петербург, Россия
**majorov_ee@mail.ru*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича*
Санкт-Петербург, Россия
[3]*Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕврАзЭС*
Санкт-Петербург, Россия
[4]*Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал)*
Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,
Ивангород, Россия

Аннотация. Проведено математическое моделирование выходного сигнала при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы анализа интерферограмм. Выходной сигнал измерительной системы проанализирован методом интегрирования. Определены требования к изменению параметров интерференционных полос. Анализ показал, что при проведении измерений необходимо, чтобы ширина полосы была много больше апертуры фотоприемника.

Ключевые слова: *интерференционная полоса, волновой вектор, фаза полос, фотоприемное устройство, выходной сигнал, апертурный угол, величина смещения, интерферограмма*

Ссылка для цитирования: *Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Пушкина В. П.* Математическое моделирование выходного сигнала при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы анализа интерферограмм // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 313—319. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319.

MATHEMATICAL MODELING OF THE OUTPUT SIGNAL FOR DIFFERENT PHOTODETECTOR APERTURE GEOMETRIES IN INTERFERENCE SYSTEM OF INTERFEROGRAM ANALYSIS

E. E. Maiorov[*1], A. V. Arefiev[1], Yu. M. Borodyansky[2],
R. B. Guliyev[3], A. V. Dagaev[4], V. P. Pushkina[1]

[1]*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,*
St. Petersburg, Russia
majorov_ee@mail.ru
[2]*The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications,*
St. Petersburg, Russia
[3]*University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC,*
St. Petersburg, Russia
[4]*Ivangorod Humanitarian and Technical Institute*
(branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation),
Ivangorod, Russia

Abstract. Mathematical modeling of the output signal of interference system for interferogram analysis is carried out for different photodetector aperture geometries. The measuring system output signal is analyzed using the integration method. The requirements for changing the interference fringes parameters are determined. According to the performed analysis, it is necessary for the bandwidth to be much larger than the photodetector aperture when carrying out measurements.

Keywords: interference band, wave vector, band phase, photodetector, output signal, aperture angle, displacement value, interferogram

© Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Пушкина В. П., 2023

For citation: Maiorov E. E., Arefiev A. V., Borodyansky Yu. M., Guliyev R. B., Dagaev A. V., Pushkina V. P. Mathematical modeling of the output signal for different photodetector aperture geometries in interference system of interferogram analysis. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 313—319 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319.

Введение. При современном состоянии рынка измерительных приборов и комплексов основная задача оптического приборостроения — максимально уделять внимание их техническим характеристикам, а не увеличивать объемы выпускаемой продукции [1, 2]. Наблюдается тенденция к увеличению доли приборов, оптические характеристики которых заведомо превосходят характеристики аналогов [3, 4].

В настоящее время различные российские корпорации приобретают оптические контролирующие приборы и системы, которые способны решать задачи повышенной сложности и предоставлять высокоточную достоверную информацию [5, 6]. При серийном производстве оптических деталей, приборов и систем необходимы такие методы и средства оптического контроля, которые дали бы возможность обеспечить успешное развитие этой отрасли [7, 8].

В настоящее время при разработке оптико-электронных приборов и комплексов повышенной производительности, оперативности, чувствительности контроля и точности измерений [9, 10] решается важнейшая задача обеспечения автоматизированного контроля в производственном цикле в режиме реального времени [11, 12]. Разработчики оптических приборов и систем стремятся повысить возможность обнаружения ошибок и дефектов, уменьшить погрешность измерений до уровня сотых долей длины волны излучения, а также увеличить диапазон измеряемых параметров [13, 14].

Анализ литературных источников подтверждает, что в этом классе приборов наиболее перспективны интерференционные [15—19]. Приборы указанного класса имеют преимущества над приборами геометрической оптики: высокая точность измерений, расстояние до контролируемой поверхности объекта не зависит от апертурных углов освещения и наблюдения; они малогабаритны, просты в эксплуатации и удовлетворяют современным требованиям производственного контроля [16—19].

Благодаря теоретическому анализу интерферометрических приборов и систем их функционирование постоянно совершенствуется; исследуются вопросы построения и эксплуатационных характеристик приборов, расширения функциональных возможностей и повышения информативности измерений, внедрения в научную и производственную практику. Поэтому представляет интерес анализ выходного сигнала для случаев прямоугольной и круговой апертур фотоприемных устройств измерительной системы.

Цель настоящей работы состояла в математическом моделировании выходного сигнала при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы анализа интерферограмм.

Постановка задачи. Необходимо проанализировать выходной сигнал измерительной системы методом интегрирования, а также определить требования к изменению параметров интерференционных полос.

*При круговой апертуре фотоприемного устройства***.** Рассмотрим выходной сигнал измерительной системы контроля различной сложности интерферограмм. Предположим, что углы малы, тогда получим выражение для интенсивности излучения в виде [2, 3, 19]:

$$I = 2E_0\left[1+\cos\left(\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}\alpha d\right)\right], \qquad (1)$$

где E_0 — вещественная амплитуда, λ — длина волны излучения, α — угол, характеризующий направление наблюдения.

На рис. 1 представлен выходной сигнал фотоприемного устройства круговой апертуры (*P* — исследуемая точка; $\mathbf{k}_0$ — волновой вектор направления освещения; **d** — вектор смещения).

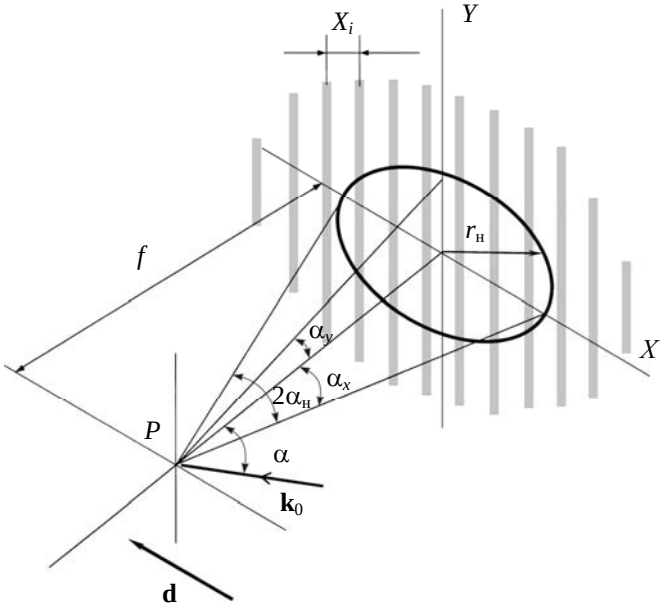


Рис. 1

При круговой апертуре $2r_н$ проинтегрируем выражение для интенсивности по площади круга радиусом $r_н$:

$$U_{кр} = \int_{-r_н}^{r_н} dy \int_{-\sqrt{r_н^2-y^2}}^{\sqrt{r_н^2-y^2}} \cos\left[\frac{2\pi dx}{\lambda f} + \omega t + \varphi_0\right] dx.$$

Пределы и переменные интегрирования $r_н$ и x, y заменим на угловые $\alpha_н$ и α_x, α_y:

$$\alpha_x = x/f;\ \alpha_y = y/f.$$

Не принимая во внимание фазовый член для определения амплитуды сигнала, получим:

$$U_{кр} = \frac{\lambda f}{\pi d} \int_{-\alpha_н}^{\alpha_н} \sin\left[\frac{2\pi d}{\lambda}\sqrt{\alpha_н^2 - \alpha_y^2}\right] d\alpha_y. \qquad (2)$$

Для понимания процесса на рис. 2 представлена графическая зависимость амплитуды сигнала при малых смещениях интерферограммы.

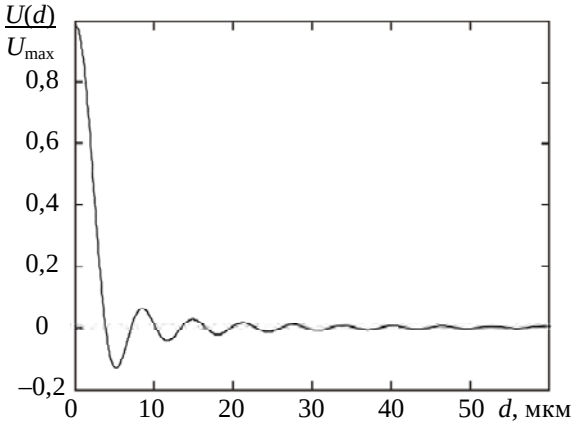


Рис. 2

*При прямоугольной апертуре фотоприемного устройства***.** При анализе сигнала фотоприемного устройства с прямоугольной апертурой интерференционные полосы в области ин-

тегрирования будем считать одинаковыми по ширине и прямолинейными, как показано на рис. 3.

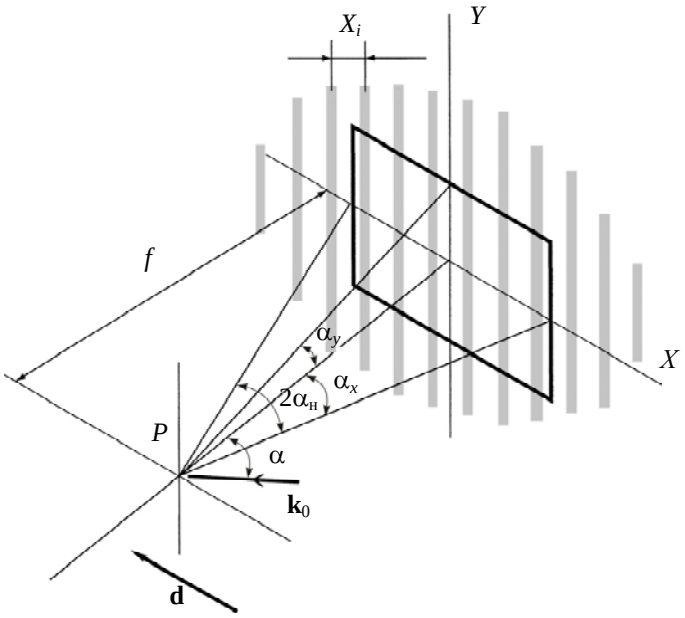


Рис. 3

Освободимся от члена, зависящего от времени, и получим:

$$U_{\text{п}} = \int\limits_{-\alpha_{\text{н}}}^{\alpha_{\text{н}}} \cos\left[\omega t + \varphi_0 + \frac{2\pi}{\lambda}\alpha_x d\right] d\alpha_x = \frac{\lambda}{\pi d}\sin\frac{2\pi d\alpha_{\text{н}}}{\lambda}\cos\left(\omega t + \varphi_0\right), \qquad (3)$$

где $2\alpha_{\text{н}}$ — апертура фотоприемника; $\varphi_0 = \dfrac{2\pi d\alpha_0}{\lambda}$ — фаза полос в центре апертуры фотоприемника (волновой вектор направления освещения $\mathbf{k}_0$ перпендикулярен вектору смещения $\mathbf{d}$); $\alpha_x = \alpha - \alpha_0$; $\alpha = \alpha_0 + \alpha_x$ — апертурный угол; α_0 — биссектриса апертурного угла наблюдения.

Экспериментальные результаты. Проанализировав выражения (2) и (3), можно сделать следующие выводы относительно обеих апертур: для величин $d_k = \dfrac{k\lambda}{2\alpha}$, где $k = \pm 1, \pm 2, \ldots$, выходной сигнал $U = 0$, а при смещениях интерферограммы на d величина сигнала падает. Это означает, что при больших величинах d измерения невозможно провести, так как отношение сигнал/шум стремится к нулю. Поэтому достоверная информация о векторе смещения при исследовании интерферограмм может быть получена лишь для малых смещений, для которых выходной сигнал поддерживается на максимально высоком уровне.

Проанализировав графическую зависимость амплитуды сигнала от величины смещения для прямоугольной апертуры (рис. 4) и выражение (3), получим первый нуль функции выходного сигнала при $\dfrac{2d\alpha_{\text{н}}}{\lambda} = 1$, или при $\dfrac{2\alpha_{\text{н}}}{x_\alpha} = 1$, где $x_\alpha = \dfrac{\lambda}{d}$ — угловой период полос.

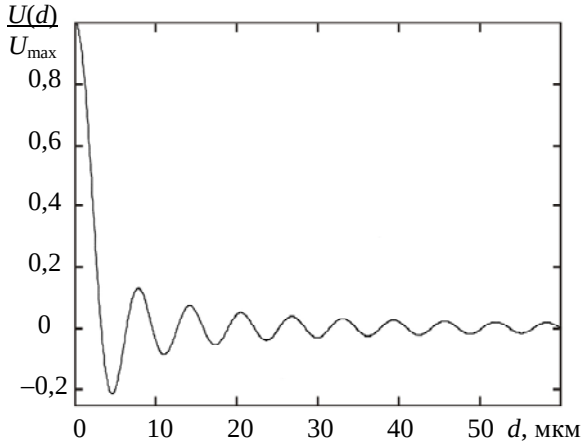


Рис. 4

Таким образом, можно сказать, что при проведении измерений необходимо, чтобы ширина полосы была много больше апертуры фотоприемника: $\frac{\alpha_н}{x_\alpha} << 1$.

Заключение. В работе показано, что для минимизации погрешности измерений с целью расширения пределов измерений величины смещения необходимо добиться, чтобы выходной сигнал при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы находился на максимально высоком уровне. Интерферометрическая система должна быть настроена таким образом, чтобы ширина полосы была много больше апертуры фотоприемника. Настоящие экспериментальные результаты представляют интерес для оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Powell R. L., Stetson K. A.* Interferometric analysis by wavefront reconstruction // J. Opt. Soc. Am. 1965. Vol. 55. P. 1593—1599.

2. *Жилкин В. А., Зиновьев В. Б.* Расшифровка интерференционных картин в методе голографического муара // ЖТФ. 1986. Т. 56, № 1. С. 113—119.

3. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.

4. *Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Цыганкова Г. А., Машек А. Ч., Константинова А. А.* Разработка оптической системы обработки голографических интерферограмм // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 7. С. 25—32. DOI: 10.25791/pribor.07.2020.1190.

5. *Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Таюрская И. С.* Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 179—189.

6. *Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Хохлова М. В.* Измерение микрорельефа негладких поверхностей автоматизированным интерферометром в низкокогерентном свете // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 211—219.

7. *Цыганкова Г. А., Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А.* Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // Приборы. 2021. № 2. С. 20—25.

8. *Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Константинова А. А., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Громов О. В.* Расчет основных параметров оптико-электронной системы наблюдения и изучения интерференционных структур на голограммах // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. № 2. С. 184—192.

9. *Хохлова М. В., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В.* Исследование оптико-электронной системы при обработке голографических пластин // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8(110). С. 103—108. DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015.

10. *Хохлова М. В., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В.* Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6(108). С. 184—189. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.029.

11. *Черняк Т. А., Бородянский Ю. М., Майоров Е. Е., Попова Е. В., Петрова Е. А., Хохлова М. В.* Математическое моделирование интерференционного сигнала и получение диапазона измерений величины смещения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 199—204. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-199-204.

12. *Майоров Е. Е., Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А.* Исследование флуктуаций фазы выходного сигнала системы фазовых измерений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 9. С. 1—6. DOI: 10.25791/pribor.9.2021.1287.

13. *Арефьев А. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Сорокин А. А., Удахина С. В.* Исследование разработанного интерференционного зонда для измерения неровностей реальных поверхностей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 2. С. 1—6. DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319.

14. *Майоров Е. Е., Коцкович В. Б., Пушкина В. П., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В.* Исследование оптических плоских поверхностей светоделительных пластин средством когерентной оптики // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 65—74.

15. *Бородянский Ю. М., Майоров Е. Е., Петрова Е. А., Попова Е. В., Курлов В. В., Удахина С. В.* Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой // Приборы. 2022. № 5(263). С. 3—7.

16. *Майоров Е. Е.* Исследование разработанной измерительной системы на основе двухлучевой интерферометрии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: 3-я Всерос. науч. конф. (СПб, 18-22 апреля 2022 г.). СПб: ГУАП, 2022. С. 52—55. DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.

17. *Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В.* Использование метода дифференцирования при обработке оптического сигнала для получения среднеквадратической ошибки измерения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 85—91. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-85-91.

18. *Майоров Е. Е. Федоренко А. Г., Чабаненко А. В., Хохлова М. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В.* Исследование геометрии освещения в двухлучевых интерферометрах // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып.8. С. 75—80. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-75-80.

19. *Майоров Е. Е., Федоренко А. Г., Хохлова М. В., Хайдаров Г. Г., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В.* Возможность использования двухчастотного излучения и интерферометра сдвига для реализации оптического гетеродинирования в голографической интерферометрии // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 51—56. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-51-56.

Сведения об авторах

Евгений Евгеньевич Майоров — канд. техн. наук, доцент; ГУАП, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru

Александр Владимирович Арефьев — канд. физ.-мат. наук, доцент; ГУАП, кафедра прикладной математики; E-mail: aaref@yandex.ru

Юрий Михайлович Бородянский — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича, кафедра безопасности информационных систем; E-mail: borodyanskyum@gmail.com

Рамиз Балахан оглы Гулиев — канд. техн. наук, доцент; Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕврАзЭС, кафедра математики и информационных технологий, E-mail: ramiz63@yandex.ru

Александр Владимирович Дагаев — канд. техн. наук, доцент; Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) ГУАП, кафедра математики, информатики и информационных таможенных технологий; E-mail: adagaev@list.ru

Вера Павловна Пушкина — канд. экон. наук, доцент; ГУАП, кафедра высшей математики и механики; E-mail: vera150465@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Powell R.L., Stetson K.A. *J. Opt. Soc. Am*., 1965, vol. 55, pp. 1593–1599.
2. Zhilkin V.A., Zinoviev V.B. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1986, no. 1(56), pp. 113–119. (in Russ.)
3. Vest Ch.M. *Holographic Interferometry*, NY, Wiley, 1979.
4. Mayorov E.E., Chernyak T.A., Tsygankova G.A., Mashek A.Ch., Konstantinova A.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 7, pp. 25–32, DOI: 10.25791/pribor.07.2020.1190. (in Russ.)
5. Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 8, pp. 179–189. (in Russ.)
6. Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliev R.B., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Khokhlova M.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 8, pp. 211–219. (in Russ.)
7. Tsygankova G.A., Maiorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A. *Devices*, 2021, no. 2, pp. 20–25 (in Russ.)
8. Mashek A.C., Tsygankova G.A., Konstantinova A.A., Maiorov E.E., Pisareva E.A., Gromov O.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 2, pp. 184–192. (in Russ.)
9. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Mayorov E.E., Arefyev A.V., Guliev R.B., Gromov O.V. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 8(110), pp. 103–108, DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015. (in Russ.)
10. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Arefyev A.V., Guliev R.B., Mayorov E.E., Gromov O.V. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 6(108), pp. 184–189, DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.029. (in Russ.)
11. Chernyak T.A., Borodyansky Yu.M., Maiorov E.E., Popova E.V., Petrova E.A., Khokhlova M.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 6, pp. 199–204, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-199-204. (in Russ.)
12. Maiorov E.E., Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics,* 2021, no. 9, pp. 1–6, DOI: 10.25791/pribor.9.2021.1287 (in Russ.)
13. Arefiev A.V., Kotskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Sorokin A.A., Udakhina S.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2022, no. 2, pp. 1–6, DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319 (in Russ.)
14. Maiorov E.E., Kotskovich V.B., Pushkina V.P., Arefiev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2022, no. 2(32), pp. 65–74. (in Russ.)
15. Borodyansky Yu.M., Maiorov E.E., Petrova E.A., Popova E.V., Kurlov V.V., Udakhina S.V. *Devices*, 2022, no. 5(263), pp. 3–7. (in Russ.)
16. Maiorov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems), Third All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2022, pp. 52–55, DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3. (in Russ.)
17. Maiorov E.E., Pushkina V.P., Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliev R.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 85–91, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-85-91. (in Russ.)
18. Maiorov E.E., Fedorenko A.G., Chabanenko A.V., Khokhlova M.V., Guliev R.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 75–80, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-75-80. (in Russ.)
19. Maiorov E.E., Fedorenko A.G., Khokhlova M.V., Khaidarov G.G., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 51–56, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-51-56. (in Russ.)

Data on authors

Evgeny E. Maiorov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru
Aleksander V. Arefiev	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: aaref@yandex.ru
Yury M. Borodyansky	—	PhD, Associate Professor; The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Information Systems Security; E-mail: borodyanskyum@gmail.com
Ramiz B. Guliyev	—	PhD, Associate Professor; University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, Department of Mathematics and Information Technologies, E-mail: ramiz63@yandex.ru
Alexander V. Dagaev	—	PhD, Associate Professor; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute (branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation), Department of Mathematics, Computer Science and Information Customs Technologies; E-mail: adagaev@list.ru
Vera P. Pushkina	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail: vera150465@yandex.ru

Received 23.11.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 28.02.23.

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

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

УДК 620.179.1; 620.192
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-320-334

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

А. А. Беспалько*, Д. Д. Данн, П. И. Федотов, С. А. Дмитриева, Ц. Ло

Томский политехнический университет, Томск, Россия,
**besko48@tpu.ru; dddann@tpu.ru; pif@tpu.ru; lulubvv@foxmail.com*

Аннотация. Для разработки комплексного акустоэлектрического метода неразрушающего контроля численно и экспериментально исследуются механоэлектрические и акустоэлектрические преобразования на примере образцов магнетитовой руды и модельных дефектных диэлектрических структур на основе цементно-песчаных смесей. Приведены результаты расчетов концентрации напряжений на трещинах разных размеров при распространении внешнего детерминированного акустического импульса по образцу. Показаны результаты экспериментальных исследований электромагнитной эмиссии образцов магнетитовой руды с содержанием кальцита и магнетита при одноосном сжатии до разрушения. Показано, что по спектрам электромагнитных откликов при акустоэлектрических преобразованиях возможно достоверно определять появление и развитие деструктивных зон в диэлектрических материалах. Приведены результаты изменения параметров электромагнитных откликов цементно-песчаной смеси с дефектами при внешнем импульсном акустическом воздействии в процессе ступенчатого нагружения сжатием и сдвигом. В качестве включений (дефектов) использовали магнетитовую руду и фторопласт, обладающие соответственно большим и меньшим акустическим импедансом, чем материал модельного образца. Рассматривается влияние длительности внешнего импульсного акустического возбуждения на параметры электромагнитных откликов в процессе ступенчатого нагружения модельных образцов.

Ключевые слова: *механоэлектрические и акустоэлектрические преобразования, горные породы, диэлектрики, напряжения сжатия и сдвига, акустическое воздействие, разрушение*

Благодарности: работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-79-10156.

Ссылка для цитирования: *Беспалько А. А., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц.* Численное и экспериментальное моделирование акустоэлектрического метода неразрушающего контроля твердотельных диэлектриков // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 320—334. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-320-334.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF THE ACOUSTIC-ELECTRICAL METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF SOLID-STATE DIELECTRICS

A. A. Bespalko*, D. D. Dann, P. I. Fedotov, S. A. Dmitrieva, J. Luo

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
besko48@tpu.ru; dddann@tpu.ru; pif@tpu.ru; lulubvv@foxmail.com

Abstract. To develop a complex acoustoelectric method for non-destructive testing, mechanoelectric and acoustoelectric transformations are numerically and experimentally studied on the example of magnetite ore samples and model defective dielectric structures based on cement-sand mixtures. Results of calculations of stress concentration at cracks of different sizes during an external deterministic acoustic pulse propagation along the sample are presented.

© Беспалько А. В., Данн Д. Д., Федотов П. И., Дмитриева С. А., Ло Ц., 2023

Results of experimental studies of electromagnetic emission of samples of magnetite ore containing calcite and magnetite under uniaxial compression to fracture are demonstrated. The possibility of reliable determination the appearance and development of destructive zones in dielectric materials from the spectra of electromagnetic responses during acoustoelectric transformations is revealed. Results concerning changes in parameters of electromagnetic responses of a cement-sand mixture with defects under external pulsed acoustic action in the process of stepwise loading by compression and shear are presented. As inclusions (defects), magnetite ore and fluoroplastic are used, which have, respectively, a higher and lower acoustic impedance than the model sample material. The effect of duration of external pulsed acoustic excitation on parameters of electromagnetic responses during stepwise loading of model samples is considered.

Keywords: mechanoelectric and acoustoelectric transformations, rocks, dielectrics, compression and shear loads, acoustic impact, fracture

Acknowledment: The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 20-79-10156.

For citation: Bespalko A. V., Dann D. D., Fedotov P. I., Dmitrieva S. A., Luo J. Numerical and experimental modeling of the acoustic-electrical method for non-destructive testing of solid-state dielectrics. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 320—334 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-320-334.

Введение. Для обнаружения дефектов в твердотельных материалах в настоящее время используют различные неразрушающие методы контроля: акустические импульсные и акустоэмиссионные; электрические и электромагнитные; магнитные; рентгеновские и другие [1]. В случае диэлектрических материалов и структур целесообразно применять комплексные методы неразрушающего контроля. К таким методам относятся контактное акустическое зондирование предмета контроля и бесконтактная регистрация электромагнитного отклика на такое воздействие с последующим амплитудно-частотным анализом электромагнитного сигнала (ЭМС).

Электромагнитные отклики на внешнее акустическое возбуждение твердотельных дефектных диэлектрических [2—6] и гетерогенных [7—11] материалов возникают в результате акустоэлектрических преобразований (АЭП) в них. Такие преобразования обусловлены наличием в тестируемых объектах электрически заряженных областей разнообразной конфигурации и присутствием в них двойных электрических слоев (ДЭС) [12]. Распространяющийся по материалу одиночный акустический импульс, радиоимпульс (или последовательность таких акустических возбуждений) приводит к колебаниям двойных электрических слоев. В результате колебаний возникают электромагнитные сигналы, которые можно зарегистрировать емкостным или индукционным датчиком с последующим усилением и амплитудно-частотным анализом. Спектр электромагнитного отклика зависит от параметров воздействующего акустического импульса, характеристик зарядового состояния ДЭС и структуры контролируемого диэлектрического материала [10—13]. Уровень заряда может меняться на бортах трещин при их образовании и развитии, на границах включений и основного материала, в том числе на границах пустот [13, 14]. В соответствии с прямым пьезоэлектрическим эффектом сегнетоэлектрические включения, когда через них проходят акустические импульсы, также являются источниками электромагнитных сигналов [15].

Акустоэлектрические преобразования наиболее проявляются при силовом нагружении контролируемого материала и внешнем детерминированном акустическом возбуждении [1—11, 16—18]. Процесс генерации ЭМС при силовом нагружении можно еще называть механоэлектрическими преобразованиями (МЭП) в твердотельных гетерогенных структурах. Помещение тестируемого объекта в электрическое поле усиливает поляризацию зарядов на ДЭС и амплитуду ЭМС [19]. Дефекты будут вызывать изменения амплитуды и спектра электромагнитных сигналов. Образующиеся при развитии разрушения трещины передают часть энергии акустическим импульсам. Распространяясь, эти импульсы взаимодействуют с окружающими зарядами на ближайших трещинах, а также с двойными электрическими слоями на контактах дефектов с вмещающим материалом. Результатом таких взаимодействий является „внутренняя“ генерация электромагнитных сигналов в виде электромагнитной эмиссии

(ЭМЭ). Эта эмиссия отображает образование и развитие деструктивных зон в диэлектрическом материале, в том числе и в дефектном. Важно определить, как различаются изменения характеристик ЭМЭ, возникающих в результате „внутренних“ акустических возбуждений, и электромагнитных сигналов при внешнем детерминированном акустическом возбуждении в процессе ступенчатого нагружения до разрушения.

В настоящей статье приводятся результаты моделирования изменения параметров акустического импульса при различных размерах трещин и удалении от места его ввода в модельный образец. Эти изменения будут влиять на параметры электромагнитных откликов при акустическом зондировании [20]. Такие преобразования возможны и в конструкционных композиционных материалах [21], а разрабатываемый комплексный метод позволит успешно выявлять образование их дефектности в процессе эксплуатации, как в энергетике, так и в механике.

Образцы и методики экспериментов. Для экспериментальных исследований механоэлектрических и акустоэлектрических преобразований в качестве модельных образцов использовали керны магнетитовой руды и скарна диаметром 42 мм и длиной 80 мм. Образцы руды подбирали так, чтобы в них содержались магнетит и кальцит. Эти минералы отличаются предельной прочностью: прочность магнетитовой руды Таштагольского месторождения находится в пределах $(14—21{,}5)\cdot10^7$ Па; прочность кальцита ниже — $(12—50)\cdot10^6$ Па [22]. Акустический импеданс магнетитовой руды $z_{мр} = 28{,}51\cdot10^6$ кг/с·м^2, а акустический импеданс кальцита $z_к = 17{,}07\cdot10^6$ кг/с·м^2. Кроме того, кальцит и магнетит существенно различаются и по электрическим характеристикам. Так, удельное электрическое сопротивление кальцита $10^7—10^{12}$ Ом·м, а у магнетита существенно ниже — $10^{-4}—10^2$ Ом·м [22]. Содержание магнетита в используемых образцах руды колебалось от 60 до 80 %. Конкретный состав определяли после разрушения образцов с помощью рентгенофазового анализа порошковым рентгеновским дифрактометром X’TRA [23].

Модельные образцы размером 100×100×100 и 50×50×100 мм изготавливали из цементно-песчаной смеси (ЦПС). Акустический импеданс такой смеси составлял $z_{цпс} = 5{,}25\cdot10^6$ кг/с·м^2 при скорости продольного звука $c_{lцпс} = 2765$ м/с и плотности $\rho_{цпс} = 1900$ кг/м^3. В качестве дефектов разных размеров использовали включения магнетитовой руды и фторопласта, имеющих существенно различающиеся характеристики по всем физическим показателям.

Эксперименты по исследованию параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при сжимающих и сдвиговых нагрузках выполнялись на базовом стенде, блок-схема которого приведена на рис. 1, *а*, *б*. В процессе эксперимента образец располагали между опорной *1* и подвижной плитами *2* автоматизированного пресса ИП500.1, который до $P = 500$ кН развивал усилие на образце. Нагрузка и скорость нагружения образца задавались с помощью специализированной программы с компьютера ПК2 *10* через систему управления (СУ) *8* на исполнительный механизм сервоклапана. Причем вид изменения нагрузки мог быть задан линейным, ступенчатым или циклическим. Информация о зависимости изменений деформации образца от прилагаемых усилий и их вид отображались также на мониторе компьютера ПК2. Одноосное сжатие проводили с постоянной скоростью 0,3 Па/с.

Внешнее импульсное акустическое возбуждение образцов проводилось ударом шарика, пролетающего через систему контроля энергии удара (система динамического воздействия, СДВ) *3* [13, 18]. Разгон шарика осуществлялся пружинным устройством (ПУ) *4*. Акустический импульс имел форму, близкую к колоколообразной, а его длительность по основанию составляла 50 мкс. СДВ состояла из металлической трубки с двумя оптическими парами. Точечный удар шариком массой 0,86 г наносился посредине свободной цилиндрической части образца через заземленную металлическую пластину толщиной 2 мм. Шарик, пролетая через оптические пары, давал две отметки на мониторе компьютера ПК1 *9*. По этим отметкам рассчитывались скорости прилета V_1 и отскока V_2 шарика. Используя найденные значения скоро-

сти и массы шарика (m), а также приближение упругого соударения шарика о металлическую пластинку, определяли энергию акустического воздействия, передаваемую образцу:

$$E_{\text{exc}} = \frac{m}{2}\left(V_1^2 - V_2^2\right), \tag{1}$$

где E_{exc} — энергия, вводимая в образец при ударе шариком. При этом потери энергии акустического импульса в пластине не учитывались. После пролета через СДВ и удара шарика в металлической пластинке возбуждался детерминированный акустический импульс, который через слой минерального масла между пластиной и образцом проходил в образец. Значения твердости материала пластины и шарика совпадали. Остаточная энергия удара, вводимая в образец, после отскока шарика составляла $(25—30)\cdot10^{-3}$ Дж. Энергию удара можно было уменьшать до $5\cdot10^{-3}$ Дж с помощью изменения поджатия пружины. Акустический сигнал, проходя через образец, регистрировался пьезоэлектрическим приемником (ПАП) *6*.

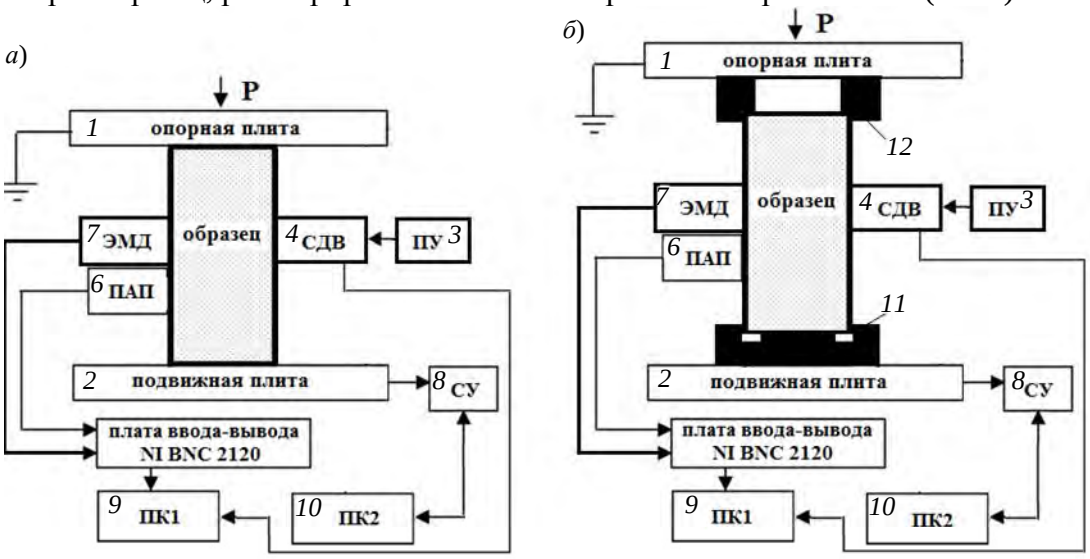


Рис. 1

Электрическую составляющую ЭМС, генерируемого образцом при прохождении акустического сигнала, регистрировали дифференциальным емкостным датчиком ЭМД *7* со встроенным усилителем мощности. В датчике использовались фильтры нижних и верхних частот, которые обеспечивали его работу в диапазоне от 1 до 100 кГц. На выходе ЭМД сигнал усиливался в десять или сто раз. Чувствительность ЭМД по входу — $5\cdot10^{-4}$ В. Сигналы с ЭМД и ПАП через многофункциональную плату ввода-вывода NI BNC 2120 *5* передавались на ПК1 *9*. В дальнейшем с помощью специальной программы амплитуда ЭМС нормировалась по амплитуде акустического импульса, возбуждаемого ударом шарика. Спектры ЭМС определялись по программе метода быстрого преобразования Фурье.

Для создания сдвиговых напряжений при одноосном сжатии использовали специальные держатели. При этом диаметр выступа нижнего держателя (*11*) был на 4—5 мм меньше диаметра отверстия в верхнем держателе (*12*). Кроме того, держатели *11* и *12* обеспечивали центровку образца, а следовательно, и совпадение осей выступа и отверстия.

Численное моделирование. Рассматривалось распространение волны в упругой неоднородной среде с заданными физико-механическими свойствами при импульсном акустическом воздействии на часть ее поверхности, проводился расчет параметров напряженно-деформированного состояния (перемещения, деформации, напряжения), использовалась простейшая классическая модель твердого тела [24—26].

Для заданного цилиндрического образца магнетитовой руды такая модель может применяться с некоторыми допущениями. Например, при решении задач о распространении волн принималось, что используемые образцы не имеют пористости, пустых полостей, а также

других явно выделяющихся включений. Исследование текстуры образцов показало, что кальцит и магнетит с перемешиванием переходят друг в друга.

В расчетах принимали акустический импульс (АИ) возбуждения, близкий к реальному акустическому импульсу по форме, амплитуде и длительности. По окончании импульсной нагрузки на верхней границе задавались нулевые значения напряжения. Когда нагрузка приложена к поверхности, акустический импульс в виде колоколообразной функции имеет вид:

$$F(x,z) = A \times \exp\left(-\beta \frac{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2}{2d_0^2} \right), \quad (2)$$

где x_0, z_0 — координаты центра источника акустического импульса, а d_0 — величина, определяющая расстояние от центра импульса, на котором нормальное напряжение уменьшается в e^{β} раз.

В общем случае система уравнений, описывающая динамику деформируемого твердого тела, включает в себя уравнения движения

$$\rho \ddot{U}_i = \rho G_i + \sigma_{ij,j}, \quad (3)$$

где ρ — плотность материала, U_i — деформация под действием акустической волны, σ_{ij} — напряжение, G_i — компоненты вектора массовых сил, i, j = 1, 2, 3. Точка над символом означает производную по времени, запятая после индекса — производную по соответствующей координате, по повторяющимся индексам производится суммирование.

Связь компонентов тензора деформаций с перемещениями из соотношения Коши представляется как:

$$\varepsilon_{ij} = 0{,}5\left(U_{i,j} + U_{j,i}\right), \quad (4)$$

а соотношения, задающие связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций, как:

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}). \quad (5)$$

Для упругого случая соотношения (5) описывают закон Гука. В прикладных задачах волновой механики при корректной постановке процессы представлены уравнениями гиперболического типа, которые описывают волновые процессы с конечной скоростью распространения. Для каждого уравнения вида

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (6)$$

используемая разностная схема соответствует простейшему варианту из семейства нецентральных схем МакКормака [27]. Для решения применялась объемная расчетная схема. Схема МакКормака предполагает использование системы прямоугольной расчетной сетки, которая обеспечивает ряд преимуществ: упрощаются математические расчеты, затрачивается меньше машинного времени для расчетов, упрощается постановка граничных условий, упрощается обработка результатов без потери информации. Наилучшие результаты дают сетки с квадратными ячейками. Этот метод аналогичен методу Рунге-Кутта [28] для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Прежде чем использовать метод Рунге-Кутта второго порядка точности, пространственные производные в уравнениях заменяли соответствующими отношениями конечных разностей. Использовались нецентральные разностные операторы, например, попеременно левые или правые разности вместо центральных разностей. Такой подход и положен в основу эффективной нецентральной схемы второго порядка, предложенной МакКормаком. Здесь граничные условия могут быть заданы через перемещения. Размер элементов в конечно-элементной модели составлял 1×1 мм. Поверхность расчета содержит 237500 точек при частоте дискретизации интервалом в 10 мкс. Расчеты выполнены для упругих образцов магнетитовой руды, используемых при проведении экспериментов ступенчатого сжатия и последующего возбуждения на ступенях детерминированным АИ. Тре-

щины разного размера задавались протяженными вдоль оси образца или вдоль распространения продольной составляющей акустического импульса. Численное моделирование проводили с помощью специального графического пакета. Результаты численного моделирования представлены в виде областей распространения интенсивности напряжений [28, 29]. Были смоделированы упругие возмущения в цилиндрической области, к боковой поверхности которой прилагалась импульсная нагрузка. Задача решалась в плоской постановке при осевом сечении модельного цилиндра, подобно реальному образцу руды, имеющего размеры 42×80 мм.

На рис. 2 показаны итоги расчетов распространения АИ по образцу с длительностью по полуширине 25 мкс в моменты времени 5, 10, 30 мкс. Расчет производили для трещины длиной 1×1 мм, расположенной вдоль оси образца на расстоянии 20 мм от возбуждаемой цилиндрической поверхности. Видно, что на трещине концентрируются напряжения, а за ней по линии распространения АИ напряжения резко спадают. Как уже отмечалось, амплитудно-частотный спектр ЭМС находится в непосредственной связи с параметрами воздействующего и изменяющегося во времени АИ. В результате изменяется и спектр ЭМС.

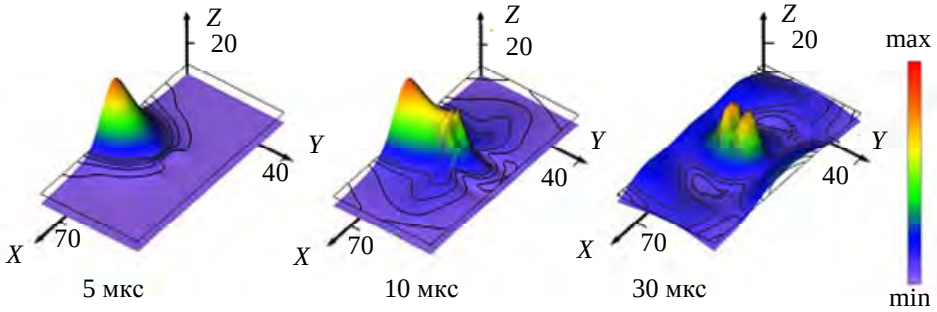


Рис. 2

На рис. 3 приведены результаты расчетов изменения интенсивности напряжений через 30·мкс после воздействия АИ на трещины различного размера, расположенные на разных расстояниях в образце. Условия ввода АИ принимались такими же, как в предыдущих расчетах. На рис. 3, *а* размер трещины 10 мм. На рис. 3, *б* представлены результаты расчетов изменения напряжений для двух трещин размером 20·и 42 мм, расположенных вдоль оси сжатия, каждая на расстоянии 10 мм от краев образца. На рис. 3, *в* расчетная область содержала несколько расположенных вдоль оси сжатия трещин размером 2, 4, 8, 16, 32, 64 мм. Расстояние между трещинами 5 мм, причем от точки приложения импульса трещины расположены в порядке возрастания — от самой маленькой до самой большой. Интенсивность возникающих напряжений показана на рис. 3, *г*. Полученные закономерности указывают, что внешние акустические воздействия существенно влияют на параметры акустоэлектрических преобразований. Это влияние будет отражаться на амплитуде и спектре генерируемых электромагнитных сигналов. Такие же закономерности будут проявляться и при механоэлектрических преобразованиях.

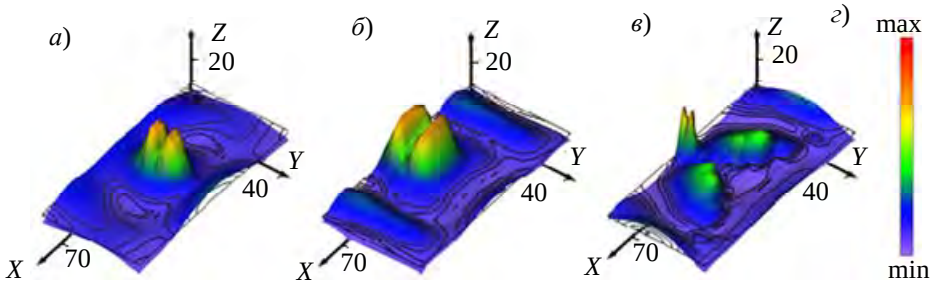


Рис. 3

Экспериментальное моделирование. На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований развития разрушения образцов 75 %-ной магнетитовой руды (рис. 4, *а*) и скарна (рис. 4, *б*) в зависимости от характеристик ЭМЭ (*А* — амплитуда ЭМЭ).

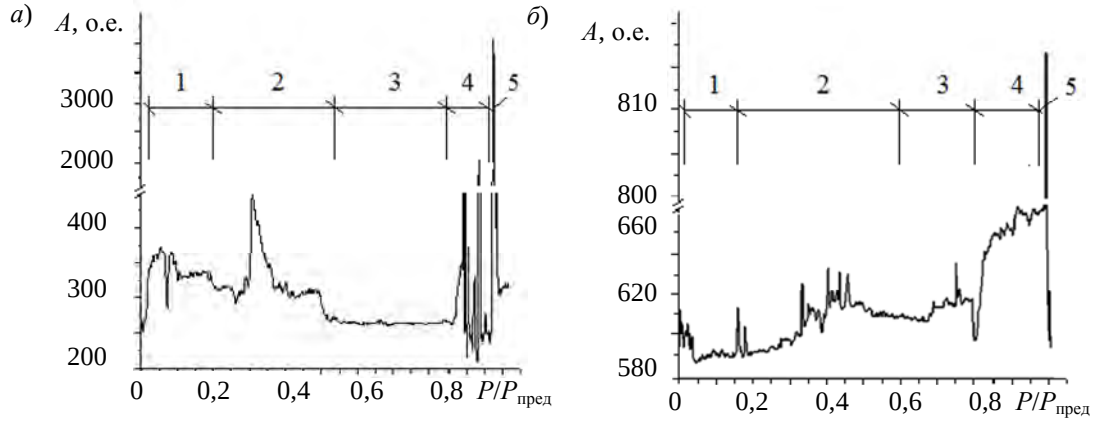


Рис. 4

Из рисунка видно, что у образцов магнетитовой руды и скарна наблюдались: этап уплотнения (1); этап формирования очага разрушения (2); этап устойчивой прочности (3); этап предразрушения (4); прорастание трещины отрыва (5). На рис. 4, *а* видно двухэтапное формирование очага разрушения. Эти этапы обусловлены присутствием в образце магнетита и кальцита. Первоначально появляются трещины во включениях кальцита, так как он менее прочен, чем магнетит. Затем начинают проявляться трещины в магнетите. При этом пик ЭМЭ кальцита значительно выше, чем при формировании разрушения в магнетите. Это обусловлено диэлектрическими свойствами кальцита, которые при формировании очага разрушения не позволяют стекать зарядам с бортов трещин и с двойных электрических слоев, образованных с участием кальцитовых включений. Это способствует существенно большему накоплению заряда на дефектах и бортах трещин в кальците, чем у магнетита, и приводит к большей интенсивности ЭМЭ при акустическом возбуждении. Такого разделения в зоне формирования очага разрушения скарна не наблюдается (рис. 4, *б*). На третьем этапе идет развитие и накопление трещин в объеме образца без снижения его прочности. В дальнейшем при повышении сжимающих напряжений по резким изменениям интенсивности ЭМЭ можно отслеживать этапы предразрушения, прорастания трещины отрыва или разрушения образца.

Представляет интерес экспериментальная проверка возможности тестирования развития деструктивных зон образцов горных пород при внешнем детерминированном акустическом зондировании под действием нарастающих сжимающих и сдвиговых напряжений. Так, для образца магнетитовой руды с 75 %-ным содержанием магнетита на рис. 5 приведены результаты внешнего возбуждения АИ в процессе ступенчатого сжатия. Акустические импульсы вводили ударом: шарик направлялся в середину поверхности образца (80 мм) перпендикулярно керну.

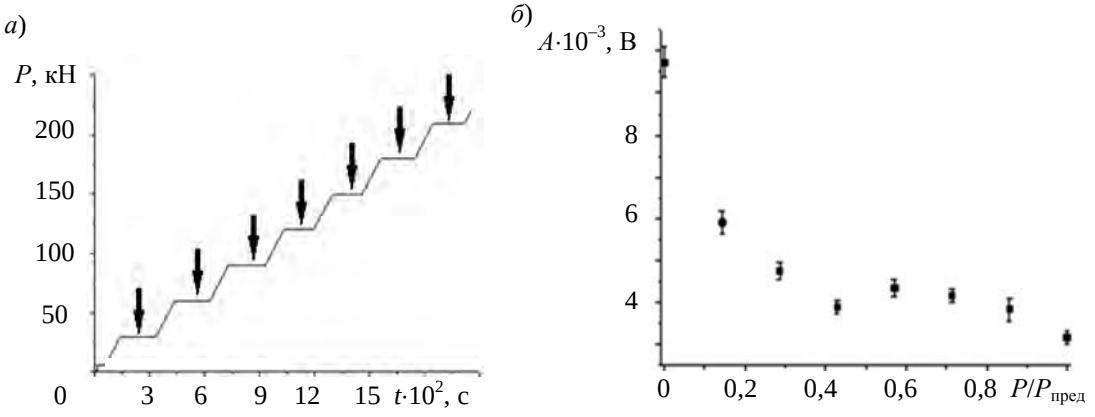


Рис. 5

На рис. 5, *а* видно нарастание ступенчатого сжимающего нагружения образца во времени, стрелками указаны моменты возбуждения. На рис. 5, *б* видно начало развития зоны деструкции образца магнетитовой руды в районе относительной нагрузки, соответствующей зна-

чению $0{,}4P_{\text{пред}}$ от разрушающих сжимающих усилий.

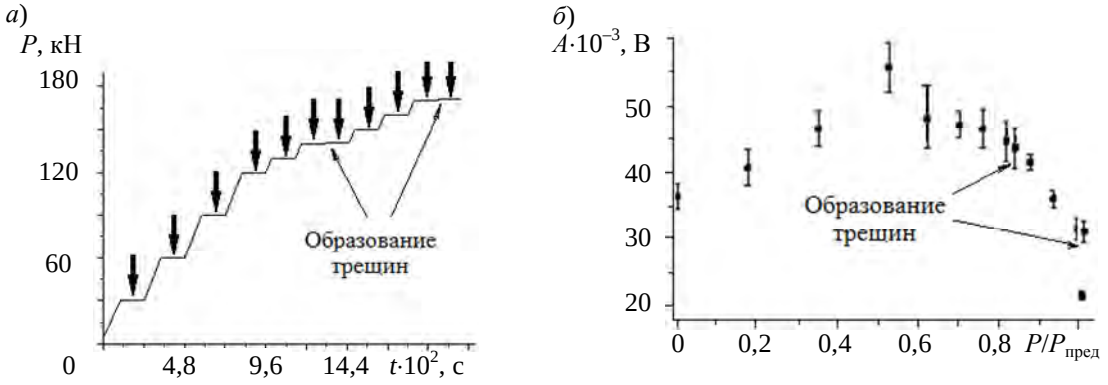


Рис. 6

На рис. 6, *а* проиллюстрировано нарастание величин ступенчатого сдвигового нагружения образца во времени, стрелками указаны моменты возбуждения. На рис. 6, *б* изменения амплитуды ЭМС носят другой характер, чем при сжатии. Здесь амплитуда электромагнитного отклика (ЭМО) на внешнее детерминированное акустическое возбуждение начинает нарастать от $(0{,}2—0{,}5)P_{\text{пред}}$ от разрушающих сжимающих усилий. Такой характер развития разрушения возможен при использовании геометрии сдвиговых напряжений в образцах, приведенной на рис. 1, *б*. В районе $(0{,}55—0{,}8)P_{\text{пред}}$ наблюдались нестационарность амплитуды ЭМС и ее небольшой спад. Это соответствует этапу устойчивой прочности, которая наблюдалась при регистрации ЭМЭ (рис. 4). В дальнейшем на участке $(0{,}8—1{,}0)P_{\text{пред}}$ происходит развитие разрушения образца.

На рис. 7 приведены спектры электромагнитных откликов на детерминированное акустическое возбуждение модельного образца с дефектом из магнетитовой руды при ступенчатых сдвиговых нагрузках.

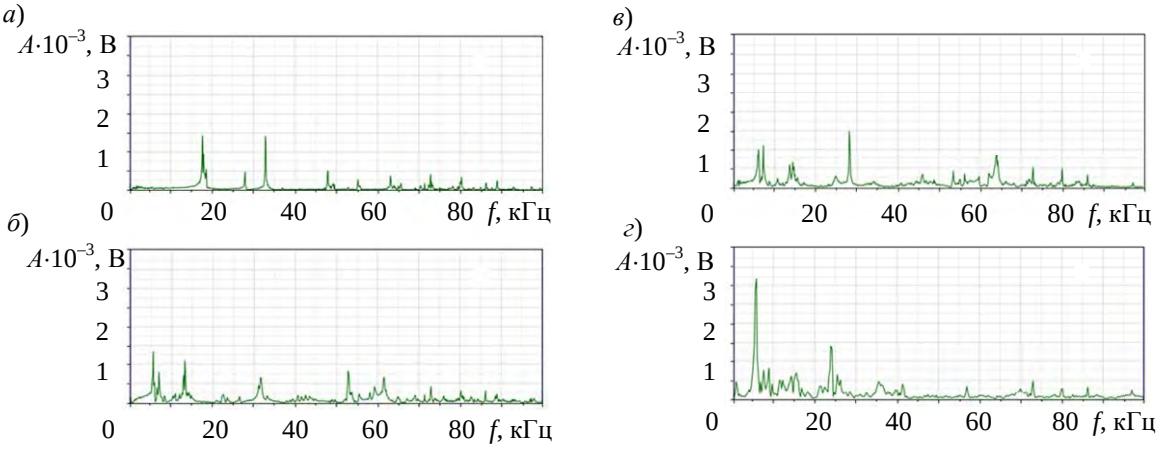


Рис. 7

На рис. 7, *а* показан спектр электромагнитного отклика образца при внешнем импульсном акустическом воздействии в отсутствие любых нагрузок. На рис. 7, *б* представлен спектр ЭМО при сдвиговом нагружении в 60 кН, а на рис. 7, *в* показан спектр ЭМО при сдвиговом нагружении в 120 кН. На рис. 7, *а* и *б* в спектре появляются дополнительные высокочастотные и низкочастотные составляющие спектра ЭМО, что соответствует развитию зоны деструкции образца. При сдвиговых нагружениях, предшествующих разрушению, спектр ЭМО полностью сдвинулся в низкочастотную область (рис. 7, *г*), что соответствует образованию трещин отрыва, ответственных за полное разрушение образца. Это обстоятельство служит хорошим ориентиром для определения стадии подготовки разрушения образцов, в том числе содержащих дефекты.

Дальнейшее детальное изучение закономерностей изменения прочности производили на

образцах из цементно-песчаной смеси 100×100×100 мм с включениями (дефектами) разного размера из магнетитовой руды с 80 %-ным содержанием магнетита. На рис. 8 приведены закономерности изменения усредненных амплитуд электромагнитных откликов образцов ЦПС с дефектом из магнетитовой руды разной толщины при ступенчатом нагружении одноосным сжатием до разрушения. Возбуждение на этих ступеньках с использованием АИ производили не менее 10 раз. Предельная прочность используемых образцов слабо различалась и в зависимости от толщины дефекта составила: 5 мм — 370 кН; 10 мм — 360 кН; 20 мм — 352 кН; 40 мм — 346 кН.

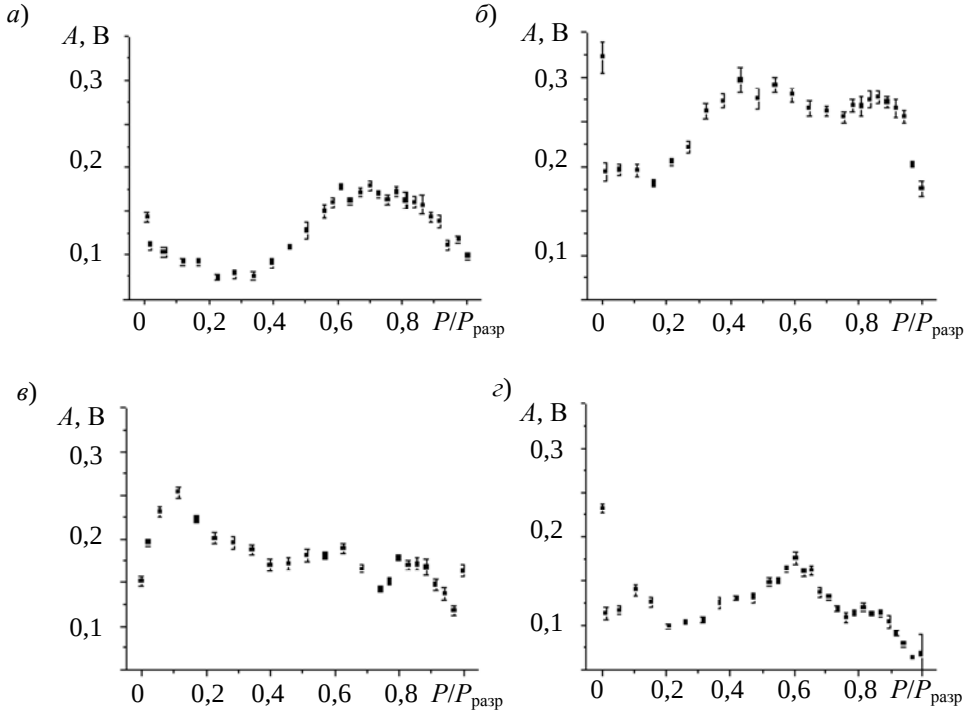


Рис. 8

На рис. 8 видно, что при зондировании таких образцов внешним акустическим импульсом для всех образцов наблюдаются этапы развития зоны деструкции и разрушающих трещин. На рис. 8 не совсем четко виден только этап устойчивой прочности. Для образца с дефектом толщиной 5 мм изменение параметров ЭМО практически совпадает со значениями откликов из бездефектного образца. В таких образцах, как уже отмечалось, акустический импеданс магнетитовой руды $z_{мр} = 28{,}51 \cdot 10^6$ кг/с·м^2 значительно выше акустического импеданса ЦПС — $z_{цпс} = 5{,}25 \cdot 10^6$ кг/с·м^2. Рассчитанный по формуле Рэлея коэффициент прохождения акустического импульса из ЦПС в дефект составил 0,52. Это может обусловливать пониженную амплитуду колебания границы основного вещества модельного образца и дефекта из магнетитовой руды. В результате в экспериментах при внешнем акустическом возбуждении образца наблюдалась генерация ЭМС небольшой амплитуды.

Для сравнения на рис. 9 приведены графики усредненных амплитуд ЭМС из образцов ЦПС с дефектами из фторопласта.

Размер образца 50×50×100 мм, а размер дефектов из фторопласта 10×10×15 (рис. 9, *б*), 20×20×30 (*г*) и 15×15×23 мм (*в*). В образце дефекты размещались посередине. Акустический импульс вводился в образец из ЦПС через площадку 50×50 мкм. Акустический импеданс фторопласта ниже, чем у ЦПС — $z_{фп} = 2{,}95 \cdot 10^6$ кг/с·м^2. В этом случае коэффициент прохождения акустического импульса из ЦПС в дефект из фторопласта равен 0,92. Амплитуда ЭМО на внешнее акустическое возбуждение такого модельного образца должна быть выше, чем у образца из ЦПС с дефектом из магнетитовой руды, что и отображается на рис. 9, *б*, *в*, *г*. На бездефектном образце ЦПС (рис. 9, *а*) деструктивная зона выделяется в районе нагрузки

(0,4—0,8)$P_{пред}$, но не совсем явно. На рис. 9, *б* и *в* эта зона четко видна. На рис. 9, *г* вид развития зоны деструкции другой, что, вероятно, связано с изменением резонансных характеристик акустического импульса возбуждения и продольного размера дефекта.

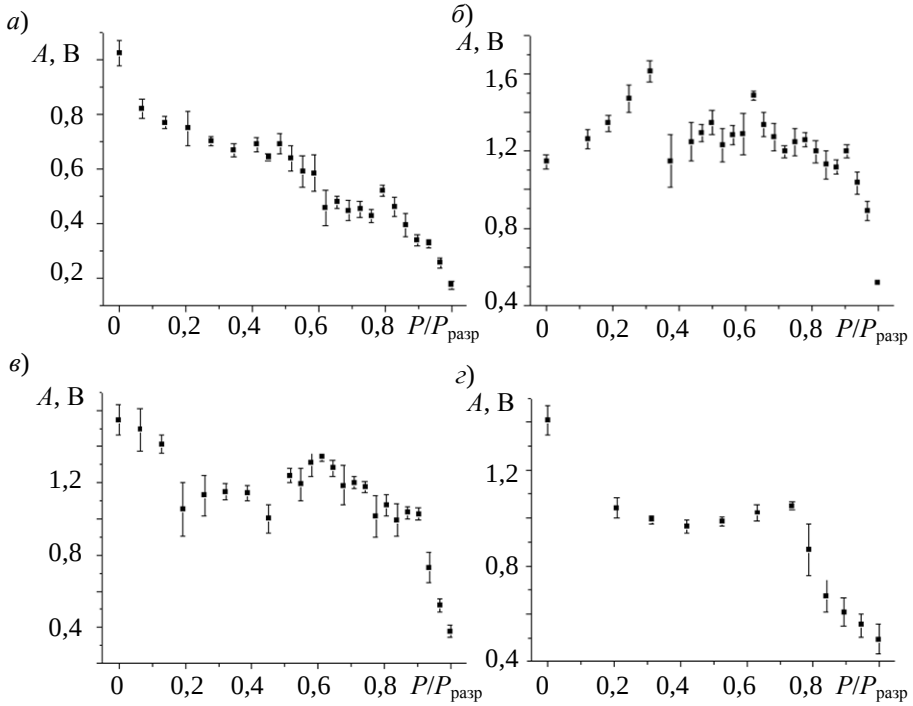


Рис. 9

Для проверки предположения о влиянии резонансных характеристик акустического импульса возбуждения на продольный размер дефекта использовали образец ЦПС размером 50×50×100·мм с прямоугольным дефектом из магнетитовой руды величиной 15×15×23 мм.

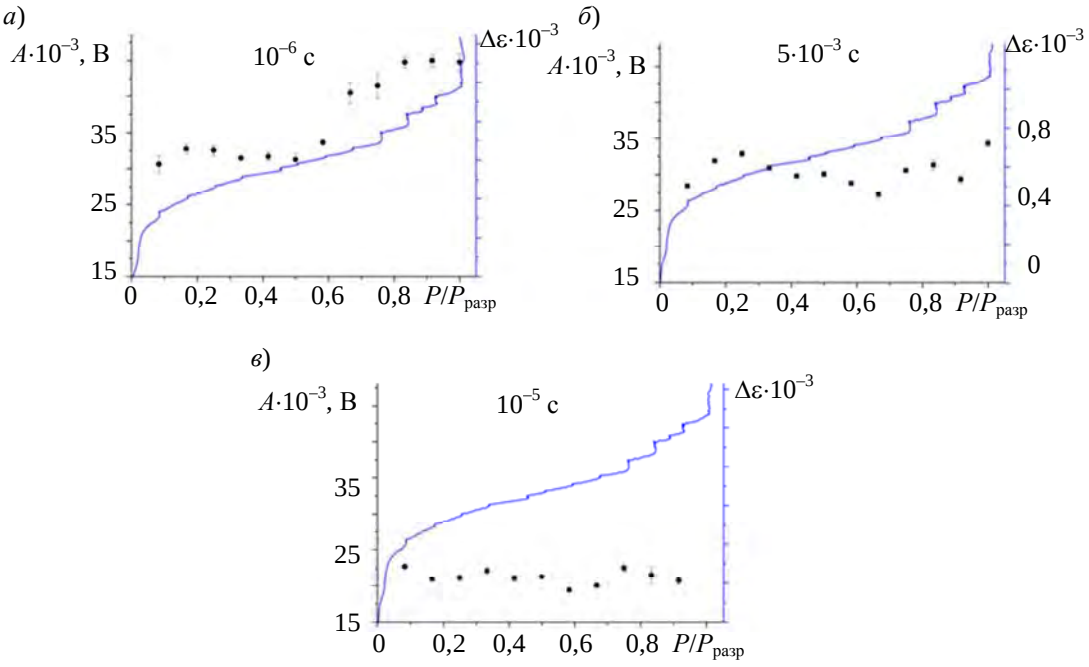


Рис. 10

На образец с помощью пьезоэлектрического излучателя подавали акустические импульсы напряжением 800 В разной длительности — 1, 5, 10 мкс (рис. 10). На рис. 10 видна зависимость изменения амплитуды ЭМС при ступенчатом нагружении сжатием модельного образца от длительности акустического импульса возбуждения. Рис. 10, *б* подтверждает предположение о влиянии длительности возбуждающего акустического импульса на параметры ЭМО.

Таким образом, на модельных образцах из ЦПС с дефектами разных размеров и разным соотношением акустического импеданса основного материала и дефекта наблюдаются амплитудные и спектральные изменения ЭМО при внешнем импульсном акустическом возбуждении в процессе сжатия или осуществления сдвиговых напряжений. Эти изменения с высокой степенью достоверности отображают этапы развития деструкции контролируемых образцов.

Обсуждение и выводы. В настоящей работе приведены результаты численных и экспериментальных исследований ЭМС при МЭП и АЭП в твердотельных гетерогенных структурах. Результаты этих исследований указывают на удовлетворительное согласие амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов. Математическое моделирование показало, что при распространении акустического импульса на трещинах разного размера, расположенных в разных местах, происходят изменения интенсивности напряжений в объеме образа. Это обусловлено увеличением импульсных колебательных напряжений на двойных электрических слоях, проявляющихся на трещинах в деструктивных зонах или на контактах дефектов с вмещающим материалом. Вследствие взаимосвязи параметров АИ и АЭП изменяется и амплитуда генерируемых ЭМС в процессе нагружения сжимающими или сдвиговыми напряжениями [15, 20]. Внешнее возбуждение с помощью АИ тестируемых образцов показало, что так же, как при МЭП, удовлетворительно отслеживаются образование и развитие деструкции, в том числе в дефектных материалах.

На рис. 5 и 6, 8 и 9 показаны изменения амплитуды ЭМО при внешнем импульсном детерминированном акустическом зондировании нагружаемых образцов сжатием или сдвиговыми напряжениями до разрушения. Одноосное сжатие и сдвиг сопровождаются развитием деструктивных зон и разрушением в результате прорастания трещин отрыва. Электромагнитные отклики на зондирующие детерминированные АИ при постоянных значениях прикладываемых напряжений в процессе одноосного сжатия или сдвига существенно различаются по амплитуде и виду. Но в обоих случаях по ходу изменения амплитуды ЭМС отчетливо отмечаются зоны начала образования деструктивных процессов и их развития.

Из рис. 4, *а*, *б*, рис. 5, *б* и 6, *б* видно, что процессы развития разрушения при сжатии и сдвиге имеют свои закономерности. Это обусловлено тем, что при сжатии процесс разрушения развивается в объеме всего образца. В этом случае отчетливо выделяются этапы уплотнения, формирования очага разрушения, устойчивой прочности, предразрушения и прорастания разрушающих трещин (трещин отрыва). При сдвиговых напряжениях, созданных так, как показано на рис. 1, *б*, процесс разрушения большей частью развивается в краевых частях образца. Это обстоятельство влечет за собой различие электромагнитных откликов при нагружении сжимающими и сдвиговыми напряжениями в процессе развития деструкции образцов при внешнем детерминированном акустическом возбуждении образцов. В этом случае этап устойчивой прочности выделить трудно.

В результате проведенных исследований с дефектами, имеющими акустический импеданс меньше (фторопласт) и существенно больше (магнетитовая руда) акустического импеданса ЦПС, выявлено, что соотношение импеданса оказывает влияние на амплитуду ЭМО, возбуждаемого внешним акустическим импульсом. Очевидно, что при возникновении акустических импульсов в процессе образования и развития трещин также следует учитывать влияние акустического импеданса основного материала и дефекта. В отсутствие знаний о свойствах дефекта возможно получение сведений об его акустическом импедансе при внешнем акустическом зондировании.

Моделирование на образцах ЦПС с дефектом (включение из магнетитовой руды) показало, что контроль образования трещин и деструкции в процессе нагружения различными видами напряжений можно успешно осуществлять по спектрам электромагнитных откликов при возбуждении АИ (см. рис. 7). В этом случае на этапе образования и развития зоны деструкции материала при внешнем импульсном акустическом возбуждении спектр регистрируе-

мого ЭМО существенно расширяется как в низкочастотную, так и высокочастотную область. Такое расширение спектра ЭМО, в соответствии с моделью кинетической прочности твердых тел [30], обусловлено взаимодействием внешних АИ с появляющимися новыми микротрещинами и их срастанием при увеличении сжимающих или сдвиговых нагрузок. Таким образом, по виду амплитудно-частотного спектра при детерминированном акустическом возбуждении возможно определять размер появляющихся трещин в процессе развития разрушения образца различными видами силового нагружения.

Кроме того, экспериментальные исследования модельных образцов ЦПС с дефектами показали, что длительность внешнего акустического возбуждения за счет усиления резонансных проявлений влияет на изменения закономерностей ЭМО в зоне образования и развития деструкции при возрастании нагрузки (см. рис. 10).

Таким образом, рассмотренный в настоящей статье комплексный метод использования АЭП целесообразно использовать для тестирования дефектов и контроля процессов разрушения твердотельных диэлектрических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Клюев В. В.* Неразрушающий контроль: Справочник в 8 тт. М.: Машиностроение, 2008.
2. *Misra A., Gosh S.* Electromagnetic radiation characteristics during fatigue crack propagation and failure // Applied physics. 1980. Vol. 23. P. 387—390. DOI:10.1007/BF00903221.
3. *Хатиашвили Н. Г., Перельман М. Е.* Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // ДАН СССР. 1982. Т. 263, № 4. С. 839—842.
4. *Bespal'ko A. A., Gol'd R. M., Yavorovich L. V., Datsko D. I.* Influence Exerted by Siltstone Lamination on the Electromagnetic Signal Parameters during Acoustic Excitation of Samples // Journal of Mining Science. 2002. Vol. 38. P. 124—128. https://doi.org/10.1023/A:1021103219461.
5. *Koktavy P.* Experimental study of electromagnetic emission signals generated by crack generation in composite materials // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20, N 1. P. 15704. DOI: 10.1088/0957-0233/20/1/015704.
6. *Fursa T. V., Dann D. D., Petrov M. V., Lykov A. E.* Evaluation of Damage in Concrete under Uniaxial Compression by Measuring Electric Response to Mechanical Impact // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. Vol. 36, N 2. P. 30. DOI: 10.1007/s10921-017-0411-y.
7. *Ogawa T., Oike K., Miura T.* Electromagnetic radiations from rocks // Journal of Geophysical Research. 1985. Vol. 90. P. 6245—6249. DOI:10.1029/JD090ID04P06245.
8. *Ivanov V. V., Egorov P. V., Kolpakova P. A., and Pimonov A. G.* Crack dynamics and electromagnetic radiation in loaded rocks // Journal of Mining Science. 1988. Vol. 24, N 5. P. 406—412. DOI:10.1007/BF02498591.
9. *Yamada I., Masuda K., Mizutani H.* Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. Vol. 57, N 1—2. P. 157—168. DOI:10.1016/0031-9201(89)90225-2.
10. *O'Keefe S. G., Thiel D. V.* A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1995. Vol. 89, N 11. P. 127—135. DOI:10.1016/0031-9201(94)02994-M.
11. *Bespal'ko A. A., Yavorovich L. V., Fedotov P. I.* Diagnostics of destruction zone development in rock specimens during uniaxial compression based on the spectral characteristics of electromagnetic signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. Vol. 47, N 10. P. 41—49. DOI: 10.1134/S1061830911100068.
12. *Молоцкий М. И., Малюгин В. Б.* Энергетический спектр механоэлектронов // Физика твердого тела. 1983. Т. 25, вып. 10. С. 2892—2895.
13. *Fursa T. V., Utsyn G. E., Petrov M., Dann D. D., Sokolovskiy A. N.* Detecting degradation in reinforced concrete subjected to uniaxial compression, using the parameters of electric response to mechanical impact // Research in Nondestructive Evaluation. 2019. Vol. 30, is. 6. P. 317—333. DOI:10.1080/09349847.2018.1522404.

14. *Bespal'ko A. A., Gold R. M., Yavorovich L. V.* Influence of calcite electrification on parameters of electromagnetic signals under pulsed acoustic influence // Physical mesomechanics. 2004. Vol. 7, N 5. P. 95—99. DOI: 10.1023/A:1021103219461

15. *Bespal'ko A., Surzhikov A., Fedotov P., Pomishin E., Stary O.* Polarization and Electromagnetic Emissions of Natural Crystalline Structures upon Acoustic Excitation // Materials Science Forum. 2019. Vol. 970. P. 153—166. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.153.

16. *Nitsan U.* Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks // Geophysical Research Letters. 1977. Vol. 4, N 8. P. 333—337. DOI:10.1029/GL004I008P00333.

17. *Bolotin Yu. I.* Electroacoustic-emission coefficient of normal-rupture cracks in rock failure // Journal of Mining Science. 1993. Vol. 29, N 1. P. 36—38. DOI:10.1007/BF00734329.

18. *Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A.* Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes // Strain. 2010. Vol. 47. P. 144—152. DOI:10.1111/j.1475-1305.2010.00750.x.

19. *Bespal'ko A. A., Surzhikova A. P., Dann D. D., Utsin G. E., Petrov M. V., and Pomishin E. K.* Modelling Acoustic–Electric Nondestructive Testing for Defects in Dielectric Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. Vol. 57, N 2. P. 85—95. DOI:10.1134/S1061830921020029.

20. *Bespal'ko A. A., Isaev Y. N., Dann D. D., Pomishin E. K., Fedotov P. I., Petrov M. V., and Utsin G. E.* Transformation of Acoustic Pulses into Electromagnetic Signals in Defective Structures // Journal of Nondestructive Evaluation. 2020. Vol. 39, N 4. Art. no. 82. P. 1—14. DOI:10.1134/S1062739116020418.

21. *Абрамчук М. В., Медунецкий В. М., Перепелкина С. Ю., Суриков Д. Г.* Влияние структурных особенностей конструкционных полимерно-композиционных материалов на физико-механические свойства изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 11. С. 949—954. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-949-954.

22. Петрофизика. Геоинформационное оборудование и оснастка: Справочник. В 3 кн. Кн. 1. Горные породы и минералы / Под ред. *Н. Б. Дортмана*. М.: Недра, 1992. 391 с.

23. X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822 [Электронный ресурс]: <www.perkinelmer.com>.

24. *Hoffman J. D.* Numerical methods for engineers and scientists. NY: Marcel Dekker. Inc., 2001. 840 p.

25. *Ziman J. M.* Principles of the Theory of Solids. Cambridge University Press, London, 1972. 435 p.

26. *Давыдов А. С.* Теория твердого тела. М.: Наука, 1976. 640 с.

27. *Hairer E., Wanner G.* Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential-algebraic problems. 2nd ed. Berlin, NY: Springer-Verlag, 1996. DOI: 10.1007/978-3-662-09947-6.

28. *Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Тартаковский Д. В.* Теория упругости и пластичности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 416 с.

29. *Molotnikov V., Molotnikova A.* Theory of Elasticity and Plasticity / A Textbook of Solid Body Mechanics. Springer Intern. Publishing, 2021. 444 p.

30. *Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.

Сведения об авторах

Анатолий Алексеевич Беспалько — д-р техн. наук; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников; вед. научный сотрудник; E-mail: besko@tpu.ru

Денис Дмитриевич Данн — канд. техн. наук; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников; научный сотрудник; E-mail: dddann@tpu.ru

Павел Иванович Федотов — канд. техн. наук; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников; инженер; E-mail: pif@tpu.ru

Софья Алексеевна Дмитриева — аспирант; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников;
E-mail: dmitrieva_sa93@mail.ru

Цзюньхуа Ло — аспирант; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников;
E-mail: lulubvv@foxmail.com

Поступила в редакцию 17.10.22; одобрена после рецензирования 21.11.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol'* (Unbrakable Control), Handbook in 8 volumes, Moscow, 2008. (in Russ.)
2. Misra A., Gosh S. *Applied physics*, 1980, vol. 23, pp. 387–390, DOI:10.1007/BF00903221.
3. Khatiashvili N.G., Perelman M.E. *Soviet Physics. Doklady*, 1982, no. 4(263), pp. 839–842, http://mi.mathnet.ru/dan45200. (in Russ.)
4. Bespal'ko A.A., Gol'd R.M., Yavorovich L.V., Datsko D.I. *Journal of Mining Science*, 2002, vol. 38, pp. 124–128, https://doi.org/10.1023/A:1021103219461.
5. Koktavy P. *Measurement Science and Technology*, 2009, no. 1(20), pp. 15704, DOI: 10.1088/0957-0233/20/1/015704.
6. Fursa T.V., Dann D.D., Petrov M.V., Lykov A.E. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, no. 2(36), pp. 30, DOI: 10.1007/s10921-017-0411-y.
7. Ogawa T., Oike K., Miura T. *Journal of Geophysical Research*, 1985, vol. 90, pp. 6245–6249, DOI:10.1029/JD090ID04P06245.
8. Ivanov V.V., Egorov P.V., Kolpakova P.A. and Pimonov A.G. *Journal of Mining Science*, 1988, no. 5(24), pp. 406–412, DOI:10.1007/BF02498591.
9. Yamada I., Masuda K., Mizutani H. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1989, no. 1-2(57), pp. 157–168, DOI:10.1016/0031-9201(89)90225-2.
10. O'Keefe S.G., Thiel D.V. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995, no. 11(89), pp. 127–135, DOI:10.1016/0031-9201(94)02994-M.
11. Bespal'ko A.A., Yavorovich L.V., Fedotov P.I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, no. 10(47), pp. 41–49, DOI: 10.1134/S1061830911100068.
12. Molotsky M.I., Malyugin V.B. *Soviet Physics, Solid State*, 1983, no. 10(25), pp. 2892–2895. (in Russ.)
13. Fursa T.V., Utsyn G.E., Petrov M., Dann D.D., Sokolovskiy A.N. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2019, no. 6(30), pp. 317–333, DOI:10.1080/09349847.2018.1522404.
14. Bespal'ko A.A., Gold R.M., Yavorovich L.V. *Physical mesomechanics*, 2004, no. 5(7), pp. 95–99, DOI: 10.1023/A:1021103219461.
15. Bespal'ko A., Surzhikov A., Fedotov P., Pomishin E., Stary O. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 970, pp. 153–166, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.153.
16. Nitsan U. *Geophysical Research Letters*, 1977, no. 8(4), pp. 333–337, DOI:10.1029/GL004I008P00333.
17. Bolotin Yu.I. *Journal of Mining Science*, 1993, no. 1(29), pp. 36–38, DOI:10.1007/BF00734329.
18. Lacidogna G., Carpinteri A., Manuello A., Durin G., Schiavi A., Niccolini G., Agosto A. *Strain*, 2010, vol. 47, pp. 144–152, DOI:10.1111/j.1475-1305.2010.00750.x.
19. Bespal'ko A.A., Surzhikova A.P., Dann D.D., Utsin G.E., Petrov M.V. and Pomishin E.K. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2021, no. 2(57), pp. 85–95, DOI:10.1134/S1061830921020029.
20. Bespal'ko A.A., Isaev Y.N., Dann D.D., Pomishin E.K., Fedotov P.I., Petrov M.V. and Utsin G.E. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, no. 4(39), pp. 1–14, DOI:10.1134/S1062739116020418.
21. Abramchuk M.V., Medunetsky V.M., Perepelkina S.Yu., Surikov D.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 11(64), pp. 949–954, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-949-954. (in Russ.)
22. Dortman N.B., ed., *Geoinformatsionnoye oborudovaniye i osnastka: Spravochnik. V trekh knigakh. Kniga pervaya. Gornyye porody i mineraly* (Petrophysics. Geoinformation Equipment and Equipment: a Handbook. In three books. Book one. Rocks and Minerals), Moscow, 1992, 391 p. (in Russ.)
23. *X-ray flat panel detector PerkinElmer XRD 0822*, www.perkinelmer.com.
24. Hoffman J.D. *Numerical methods for engineers and scientists*, NY, Marcel Dekker. Inc., 2001, 840 p.
25. Ziman J.M. *Principles of the Theory of Solids*, Cambridge University Press, London, 1972, 435 p.
26. Davydov A.S. *Teoriya tverdogo tela* (Solid State Theory), Moscow, 1976, 640 p. (in Russ.)
27. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential-algebraic problems*, Berlin, NY, Springer-Verlag, 1996, DOI: 10.1007/978-3-662-09947-6.
28. Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Tartakovsky D.V. *Teoriya uprugosti i plastichnosti* (Theory of Elasticity and Plasticity), Moscow, 2002, 416 p. (in Russ.)
29. Molotnikov V., Molotnikova A. *Theory of Elasticity and Plasticity/A Textbook of Solid Body Mechanics*, Springer Intern. Publishing, 2021, 444 p.
30. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* (Kinetic Nature of the Strength of Solids), Moscow, 1974, 560 p. (in Russ.)

Data on authors

Anatoly A. Bespalko — Dr. Sci.; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; Leading Researcher; E-mail: besko@tpu.ru

Denis D. Dann — PhD; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; Researcher; E-mail: dddann@tpu.ru

Pavel I. Fedotov — PhD; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; Engineer; E-mail: pif@tpu.ru

Sofia A. Dmitrieva — Post-Graduate Student; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; E-mail: dmitrieva_sa93@mail.ru

Junhua Luo — Post-Graduate Student; Tomsk Polytechnic University, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics; E-mail: lulubvv@foxmail.com

Received 17.10.22; approved after reviewing 21.11.22; accepted for publication 28.02.23.

УДК 543.42; 621.384.3
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-335-341

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ОПТОВОЛОКОННОГО КЮВЕТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В ВОЗДУХЕ В НЕФТЕГАЗОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

И. Г. Чобанзаде[*1], А. Э. Бабаханов[2]

[1] *Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан*
ichobanzada@slb.com
[2] *Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджан*
babakhan2000@yahoo.com

Аннотация. Статья посвящена разработке оптоволоконного кюветного измерителя концентрации метана в нефтегазовом производстве. Предметом исследования является разработка теоретических основ оптимизации конструкции такого измерителя, при которой основной режимный показатель измерителя достигает экстремальной величины. Цель работы заключается в исследовании возможности нахождения оптимальной взаимосвязи между основными режимными показателями, при которой выбранный критерий оптимизации достигает максимального значения. Составлена задача безусловной оптимизации, в которой дополнительно используемое условие присоединяется к функционалу оптимизации с помощью множителя Лагранжа. Получена такая форма функциональной связи между основными режимными показателями, при которой функционал цели достигает минимальной величины. Обнаруженная взаимосвязь между основными показателями охарактеризована как наихудшая, которой на практике следует избегать.

Ключевые слова: *измеритель, концентрация, метан, кювета, оптимизация, функционал*

Ссылка для цитирования: *Чобанзаде И. Г., Бабаханов А. Э.* Вопросы разработки оптоволоконного кюветного измерителя концентрации метана в воздухе в нефтегазовом производстве // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 335—341. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-335-341.

ISSUES OF DEVELOPING A FIBER-OPTIC CUVETTE METER FOR THE CONCENTRATION OF METHANE IN THE AIR IN OIL AND GAS INDUSTRY

I. G. Chobanzade[*1], A. E. Babakhanov[2]

[1]*National Aerospace Agency of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan*
ichobanzada@slb.com
[2]*State Oil Company of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan*
babakhan2000@yahoo.com

Abstract. The article is devoted to the development of a fiber-optic cuvette meter of methane concentration at oil and gas enterprises. The subject of the study is the development of theoretical foundations for optimizing the design of such a meter in which the main operating indicator of the meter reaches an extreme value. The purpose of the work is to investigate the possibility of finding the optimal relationship between the main regime indicators, at which the selected optimization criterion reaches the maximum value. An unconstrained optimization problem is formulated, in which an additional condition is added to the optimization functional using the Lagrange multiplier. A form of functional connection between the main regime indicators has been obtained, in which the goal functional reaches a minimum value. The found relationship between the main indicators is characterized as the worst, which should be avoided in practice.

Keywords: meter, concentration, methane, cuvette, optimization, functional

For citation: Chobanzade I. G., Babakhanov A. E. Issues of developing a fiber-optic cuvette meter for the concentration of methane in the air in oil and gas industry. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 335—341 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-335-341.

© *Чобанзаде И. Г., Бабаханов А. Э., 2023*

Введение. Хорошо известно, что метан является основным компонентом природного газа и в то же время фактором, вызывающим парниковый эффект. Средства оптического измерения концентрации метана могут быть разделены как по области применения этих измерителей, так и по используемому спектральному диапазону (известны конструкции, использующие эффект поглощения на длине волны 1653,7 нм) [1—4]. Измерители концентрации могут использоваться в сельском хозяйстве [5], при исследовании различных резервуаров [6], при изучении подводных просачиваний метана в озерах [7], в земледелии [8], в коммунальном хозяйстве [9], на предприятиях по сбору и обработке газа [10].

Как отмечается в работе [10], исследование промышленных предприятий по сбору и обработке газа показало, что эмиссия метана на предприятиях сбора изменяется в пределах 0,7—700 кг/ч, в то время как на предприятиях по обработке этот показатель изменялся в пределах 3—600 кг/ч. Исследовались газовые трубопроводы, компрессоры, двигатели внутреннего сгорания, турбины, системы дегидратации, системы удаления сульфида водорода и иное оборудование. Полученные результаты показывают, что соответствующие промышленные предприятия все еще являются основными источниками эмиссии метана в атмосферу и оценка объема таких выбросов остается актуальной задачей, для решения которой могут быть использованы измерители метана разной конструкции. Анализ литературы по оптоэлектронным абсорбционным измерителям со встроенной кюветой [11—15] показывает, что развитие данного направления характеризуется широким применением оптоволоконных элементов и перестраиваемых лазеров. Например, в работе [11] предложена конструкция измерителя концентрации метана, в которой для калибровки показаний используется внутренняя калибрационная кювета, заполненная газом. В работе [12] представлена конструкция измерителя утечек метана в инфракрасном диапазоне (1,64 мкм). Отмечается, что использование светоизлучающих диодов и диода Шоттки типа NiSi/n-SI позволяет обнаруживать концентрацию метана на уровне 3 %.

В работах [13—15] предложены различные модификации лазерных измерителей метана с использованием газовых кювет. Так, в [13] использована наполненная исследуемым газом многовходовая кювета, через которую многократно проходит лазерный луч. В статье [14] показано, что использование полостного оптоволокна типа HC-PBF позволяет проводить измерения метана на длине волны 1670 нм. В работе [15] для измерения концентрации метана используется метод модуляции длины волны лазерного излучателя. Метод основан на законе Ламберта—Бера, согласно которому интенсивность оптического сигнала I, прошедшего через кювету, наполненную газом, определяется как

$$I = I_0 \exp(-\alpha CL), \tag{1}$$

где I_0 — исходная интенсивность оптического сигнала; α — коэффициент поглощения газа; C — концентрация газа; L — длина пути сигнала.

В статье [15] показано: если модулировать частоту лазера по косинусоидальному закону, то вторая гармоника Фурье составляющих сигнала на выходе кюветы будет иметь амплитуду, пропорциональную по величине коэффициенту абсорбции:

$$H_2 = I_0 \alpha CL. \tag{2}$$

Вместе с тем, очевидно, что модулировать частоту лазерного излучателя технически намного сложнее, чем изменить интенсивность исходного лазерного луча. При этом также требуется синхронизация приемной стороны по частоте с узлами частотной модуляции луча.

С учетом вышесказанного нами предлагается принцип амплитудной модуляции исходного лазерного луча по интенсивности, в зависимости от длины хода оптического луча в кювете, заполненной газом. При этом предлагается изготовить кювету в виде неравнобедренной трапеции, длина хода луча в которой различается. Цель настоящей статьи — найти взаимосвязь

интенсивности лазерного луча и длины хода луча при наложении общего ограничения на суммарную длину хода луча по всем каналам.

Предлагаемый метод предусматривает оперативное изменение интенсивности лазерного излучателя с помощью управляющего драйверного узла. На рис. 1 приведена схема драйверного управления интенсивностью лазерного излучения (*1* — диодный лазер; *2* — матрица резисторов; *3* — группа переключателей; *4* — узел управления; *5* — блок питания).

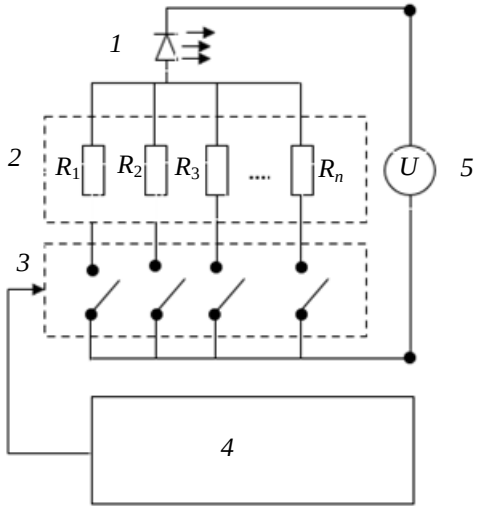


Рис. 1

В основе предлагаемого метода лежит принцип использования многосекционной газовой кюветы в виде неравнобедренной трапеции с числом входов и выходов *n*. На рис. 2 приведена трапецеидальная конструкция газовой кюветы, в которой длина хода луча изменяется от L_1 до L_n.

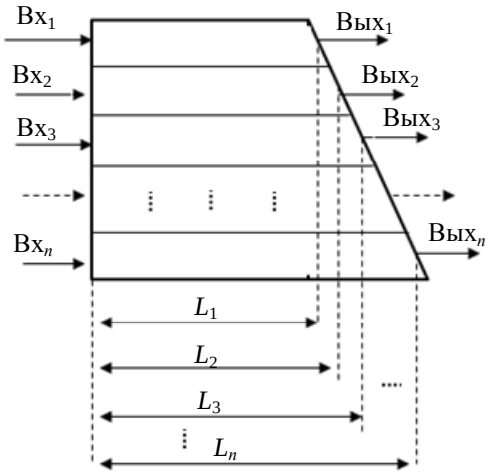


Рис. 2

Задачей оптимизации в предлагаемом измерителе концентрации метана с использованием кюветы является нахождение такого порядка подачи элементов множества

$$I_0 = \{I_{01}, I_{02}, I_{03}, \ldots I_{0n}\} \tag{3}$$

на входы $\{\text{Вх}_i\}$ кюветы трапецеидальной формы, при котором суммарный сигнал на выходах $\{\text{Вых}_2\}$ кюветы достиг бы максимума. В этом случае имеем

$$\psi_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n} I_{0i}}{\sigma_{\text{шум}}}; \quad \psi_\Sigma \to \max, \tag{4}$$

где ψ_Σ — суммарное отношение сигнал/шум; $\sigma_{\text{шум}}$ — суммарные шумы в системе; $\sigma_{\text{шум}} = \text{const}$. Следовательно, (4) представляет собой общий критерий оптимизации. Очевидно, что чем выше ψ_Σ, тем с большей достоверностью может быть вычислена величина C.

Второй задачей является ограничение на суммарную длину хода луча, т.е.

$$\sum_{i=1}^{n} L_i = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \tag{5}$$

Покажем, что задачи (4) и (5) могут быть решены путем оптимизации порядка подключения лазерных лучей разной интенсивности по входам кюветы трапецеидальной формы.

Оптимизация лазерного измерителя метана с трапецеидальной многосекционной кюветой. Введем в рассмотрение функциональную зависимость

$$L = f\left(I_0\right). \tag{6}$$

В этом случае выражение (1) перепишем как

$$I = I_0 \exp\left(-\alpha C \cdot f\left(I_0\right)\right). \tag{7}$$

Допускаем, что I_0 в линейном порядке изменяется от нуля до $I_{0\max}$ с соблюдением условия (5). Суммируя по всем i, получим

$$I_{\Sigma g} = \sum_{i=1}^{n} I_i = \sum_{i=1}^{n} I_{0i} \exp\left(-\alpha C \cdot f\left(I_0\right)\right). \tag{8}$$

Непрерывные аналоги (5) и (8) соответственно будут иметь следующий вид:

$$\int_0^{I_{0\max}} L\left(I_0\right) dI_0 = C_2, \tag{9}$$

$$I_{\Sigma \text{н}} = \int_0^{I_{0\max}} I_0 \exp\left(-\alpha C \cdot f\left(I_0\right)\right) dI_0. \tag{10}$$

С учетом (9) и (10) составим следующую задачу оптимизации:

$$I_{\Sigma \text{н}} = \int_0^{I_{0\max}} I_0 \exp\left(-\alpha C \cdot f\left(I_0\right)\right) dI_0 + \lambda \left[\int_0^{I_{0\max}} f\left(I_0\right) dI_0 - C_2 \right], \tag{11}$$

где λ — множитель Лагранжа.

Решим задачу (11) согласно методу Эйлера:

$$-I_0 \alpha C \exp\left(-\alpha C \cdot f\left(I_0\right)\right) + \lambda = 0, \tag{12}$$

откуда находим

$$I_0 \alpha C \exp\left(-\alpha C \cdot f\left(I_0\right)\right) = \lambda. \tag{13}$$

Из (13) получим

$$f\left(I_0\right) = \frac{1}{\alpha C} \ln\left[\frac{I_0 \alpha C}{\lambda}\right]. \tag{14}$$

С учетом (9) и (14) найдем

$$\frac{1}{\alpha C}\int_0^{I_{0\max}} \ln(I_0 \alpha C) dI_0 - \frac{1}{\alpha C}\ln\lambda = C_1. \quad (15)$$

Из выражения (15) легко можно вычислить:

$$\lambda = \exp\left[\int_0^{I_{0\max}} \ln(I_0 \alpha C) dI_0 - \alpha C C_1\right] = \lambda_0. \quad (16)$$

Следовательно, из (14) и (16) имеем

$$f\left(I_0\right) = \frac{1}{\alpha C}\ln\left(I_0 \alpha C\right) - C_4, \quad (17)$$

где $C_4 = \frac{1}{\alpha C}\left[\int_0^{I_{0\max}} \ln(I_0 \alpha C) dI_0 - \alpha C C_1\right]; C_4 = \text{const}$.

Таким образом, выражение (17) позволяет найти условия достижения $I_{\sum \text{н}}$ экстремума. Однако проверка подынтегрального выражения в (12) на вторую производную показывает, что этот экстремум является минимумом.

Следовательно, для получения достаточно достоверного результата проводимых измерений на практике следует максимально избегать логарифмической зависимости L от I_0, которая, согласно проведенному выше анализу, может привести к минимальному значению измеряемого сигнала, а следовательно, и к малой величине отношения сигнал/шум на выходе системы.

Заключение. Таким образом, в статье сформулирована и решена задача оптимизации оптоволоконного измерителя в воздухе концентрации метана в инфракрасном диапазоне с использованием газовой кюветы. Предложена конструкция многовходовой кюветы в виде трапеции, каналы прохождения луча в которой имеют разную длину, а на вход этих каналов подается лазерное излучение разной интенсивности. Проведенная оптимизация работы многоканального измерителя с учетом некоторых ограничительных условий показала, что результат измерений с помощью такой конструкции будет минимально достоверным при наличии логарифмической зависимости длины хода луча в кювете от интенсивности соответствующего лазерного луча. Для исключения этого рекомендуется на практике избегать такой зависимости между указанными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Xian Q., Lv H., Yao Y., Cheng C., Zhou Z.* Fabrication and application of 1653.7 nm methane sensor // IEEE Photonics journal. 2022. Vol. 14, N 5. October.

2. *Cheng W., Han J., Wu Y.* Design of a methane concentration detector based on spectrum absorption // Sensors. Switzerland. 2012. Vol. 12. P. 12729—12740. DOI:10.3390/s120912729.

3. *Xu S., Chen M.* Design and modeling of non-linear infrared transducer for measuring methane using cross-correlation method // Meas. J. Intern. Meas. Confed. 2012. Vol. 45. P. 325—332. DOI:10.1016/j.measurement.2011.11.015.

4. *Gao Q., Zhang Y., Yu J., Wu S., Zhang Z., Zheng F.* Tunable multi-mode diode laser absorption spectroscopy for methane detection // Sensors Actuators A Phys. 2013. Vol. 199. P. 106—110. DOI:10.1016/j.sna.2013.05.012.

5. *Bekele W., Guinguina A., Zegeye A., Simachew A., Ramin M.* Contemporary methods of measuring and estimating methane emission from ruminants // Methane. 2022. Vol. 1. P. 82—95. https://doi.org/10.3390/methane1020008

6. *Lomov V. A.* Methods for instrumental assessment of methane emission in reservoirs // IOP. Conf. Series: Earth and environmental science. 2021. Vol. 834. P. 012032. DOI:10.1088/1755-1315/834/1/012032.

7. *Thalasso F., Anthony K. W., Irzak O., Chaleff E., Barker L., Anthony P., Hanke P., Gonzalez-Valencia R.* Technical note: Mobile open dynamic chamber measurement of methane macroseeps in lakes // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. Vol. 24. P. 6047—6058. https://doi.org/10.5194/hess-24-6047-2020.

8. *Siegenthaler A., Welch B., Pangala S. R., Peacock M., Gauci V.* Technical note: Semi-rigid chambers for methane gas flux measurements on tree stems // Biogeosciences. 2016. Vol. 13. P. 1197—1207 [Электронный ресурс]: <www.biogeosciences.net/13/1197/2016/>.

9. *Riddick S. N., Ancona R., Mbua M., Bell C. S., Duggan A., Vaughn T. L., Bennett K., Zimmerle D. J.* A quantitative comparison of methods used to measure smaller methane emissions typically observed from superannuated oil and gas infrastructure // Atmos. Meas. Tech. 2022. Vol. 15. P. 6285—6296. https://doi.org/10.5194/atm-15-6285-2022.

10. *Mitchell A. L., Tkacik D. S., Roscioli J. R., Herndon S. C., Yacovitch T. I., Martinez D. M., Vaughn T. L., Williams L. L., Sullivan M. R., Floerchinger C., Omara M., Subramanian R., Zimmerle D., Marchese A. J., Robinson A. L.* Measurements of methane emissions from natural gas gathering facilities and processing plants: Measurement results // Environmental Science & Technology. 2015. Vol. 49, N 20. P. 12602. DOI: 10.1021/acs.est.5b04018.

11. *Schoonbaert S. B., Tyner D. R., Johnson M. R.* Remote ambient methane monitoring using fiber-optically coupled optical sensors // Applied Phys. B. 2015. Vol. 119. P. 133—142. DOI:10.1007/s00340-014-6001-0.

12. *Roy S., Desikan R., Duttagupta S. P.* A novel, compact optical device for estimating the methane emissions in geological environment. November 2016 [Электронный ресурс]: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.08797.pdf>.

13. *Cao F., Liu D., Lin J., Hu B., Liu D.* Absorption measurement of methane gas with boardband light source using fiber sensor system // Front. Optoelectron. China. 2010. Vol. 3, N 4. P. 394—398.

14. *Cubillas A. M., Lopez M. S., Lazaro J. M., Conde O. M., Petrovich M. N., Higuera J. M. L.* Detection of methane at 1670-nm band with a hollow-core photonic bandgap fiber // Photonic Crystal Fibers II. 2008. Proc. SPIE. Vol. 6990. DOI:10.1117/12.780587.

15. *Wen-Qing W., Lei Z., Wei-Hua Z.* Analysis of optical fiber methane gas detection system // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. P. 401—407.

Сведения об авторах

Имран Гора Оглы Чобанзаде — Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджанской Республики; менеджер; E-mail: ichobanzada@slb.com

Аслан Эльдар Бабаханов — аспирант; Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики; E-mail: babakhan2000@yahoo.com

Поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 06.07.2021; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Xian Q., Lv H., Yao Y., Cheng C., Zhou Z. *IEEE Photonics journal*, 2022, no. 5(14), October.
2. Cheng W., Han J., Wu Y. *Sensors*, 2012, vol. 12, pp. 12729–12740, DOI:10.3390/s120912729.
3. Xu S., Chen M. *Meas. J. Intern. Meas. Confed.*, 2012, vol. 45, pp. 325–332, DOI: 10.1016/j.measurement.2011.11.015.
4. Gao Q., Zhang Y., Yu J., Wu S., Zhang Z., Zheng F. *Sensors Actuators A Phys.*, 2013, vol. 199, pp. 106–110, DOI:10.1016/j.sna.2013.05.012.
5. Bekele W., Guinguina A., Zegeye A., Simachew A., Ramin M. *Methane*, 2022, vol. 1, pp. 82–95, https://doi.org/10.3390/methane1020008.
6. Lomov V.A. *IOP. Conf. Series: Earth and environmental science*, 2021, vol. 834, pp. 012032, DOI:10.1088/1755-1315/834/1/012032.
7. Thalasso F., Anthony K.W., Irzak O., Chaleff E., Barker L., Anthony P., Hanke P., Gonzalez-Valencia R. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2020, vol. 24, pp. 6047–6058, https://doi.org/10.5194/hess-24-6047-2020.
8. Siegenthaler A., Welch B., Pangala S.R., Peacock M., Gauci V. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, pp. 1197–1207, www.biogeosciences.net/13/1197/2016/.
9. Riddick S.N., Ancona R., Mbua M., Bell C.S., Duggan A., Vaughn T.L., Bennett K., Zimmerle D.J. *Atmos. Meas. Tech.*, 2022, vol. 15, pp. 6285–6296, https://doi.org/10.5194/atm-15-6285-2022.
10. Mitchell A.L., Tkacik D.S., Roscioli J.R., Herndon S.C., Yacovitch T.I., Martinez D.M., Vaughn T.L., Williams L.L., Sullivan M.R., Floerchinger C., Omara M., Subramanian R., Zimmerle D., Marchese A.J., Robinson A.L. *Environmental Science & Technology*, 2015, no. 20(49), pp. 12602, DOI: 10.1021/acs.est.5b04018.
11. Schoonbaert S.B., Tyner D.R., Johnson M.R. *Applied Phys. B*, 2015, vol. 119, pp. 133–142, DOI:10.1007/s00340-014-6001-0.

12. Roy S., Desikan R., Duttagupta S.P. *A novel, compact optical device for estimating the methane emissions in geological environment*, November 2016, https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.08797.pdf.
13. Cao F., Liu D., Lin J., Hu B., Liu D. *Front. Optoelectron. China*, 2010, no. 3(4), pp. 394–398.
14. Cubillas A.M., Lopez M.S., Lazaro J.M., Conde O.M., Petrovich M.N., Higuera J.M.L. *Photonic Crystal Fibers II*, 2008, Proc. SPIE, vol. 6990, DOI:10.1117/12.780587.
15. Wen-Qing W., Lei Z., Wei-Hua Z. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 52, pp. 401–407.

Data on authors

Imran G. Chobanzade — National Aerospace Agency of the Azerbaijan Republic, Manager;
E-mail: ichobanzada@slb.com

Aslan E. Babakhanov — Post-Graduate Student; State Oil Company of the Azerbaijan Republic;
E-mail: babakhan2000@yahoo.com

Received 23.11.2021; approved after reviewing 06.07.2021; accepted for publication 28.02.23.

УДК 621.1.016.4:536
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-342-349

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Б. М. Мамиконян

Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал, Гюмри, Армения
gyumri@polytechnic.am

Аннотация. Предложен цифровой измеритель разности температур, в котором применяются платиновые термопреобразователи сопротивления (ПТС). Измеритель содержит измерительную цепь, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой индикатор. В измерительную цепь введен операционный усилитель для создания встречного тока в одном из ПТС, который включен в цепи обратной связи операционного усилителя. ПТС подключены по четырехпроводной линии связи, сопротивления проводов которой не нуждаются в подгонке, поскольку не влияют на результат измерения. Использован АЦП двухтактного интегрирования. На дифференциальные измерительные входы АЦП поступают сигналы падения напряжений соответствующих ПТС. На один из входов опорного напряжения АЦП поступает сигнал падения напряжения на опорном резисторе, в котором через ПТС протекает измерительный ток. Благодаря этому выходной код АЦП не зависит от измерительного тока. Выполнен метрологический анализ преобразования разности сопротивлений ПТС в цифровой код, источниками погрешностей являются напряжение смещения нуля операционного усилителя, неточность и нестабильность опорного резистора. Установлено, что рассмотренная схема измерительной цепи пригодна для использования в узкопредельных измерителях разности температур. При этом линии связи ПТС могут иметь любую длину и не нуждаться в подгонке сопротивлений соединительных проводов.

Ключевые слова: *измерение, разность температур, термопреобразователь сопротивления, измерительная цепь, измерительный ток, измерительное напряжение, опорное напряжение, погрешность измерения*

Ссылка для цитирования: *Мамиконян Б. М.* Метрологический анализ цифрового измерителя разности температур с применением термопреобразователей сопротивления // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 342—349. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-342-349.

METROLOGICAL ANALYSIS OF A DIGITAL TEMPERATURE DIFFERENCE METER USING THERMAL RESISTANCE CONVERTERS

B. M. Mamikonyan

National Polytechnic University of Armenia, Gyumri Branch, Gyumri, Armenia
gyumri@polytechnic.am

Abstract. A digital temperature difference meter is proposed, in which platinum resistance thermal converters are used. The meter contains a measuring circuit, an analog-to-digital converter (ADC), and a digital indicator. An operational amplifier is introduced into the measuring circuit to create a countercurrent in one of the resistance thermal converters included in the feedback circuit of the operational amplifier. The thermal converters are connected via a four-wire communication line. The line wire resistances do not affect the measurement result and therefore do not need to be adjusted. A push-pull integration ADC is applied. The differential measuring inputs of the ADC receive voltage drop signals from corresponding thermal converters. One of the reference inputs of the ADC receives a voltage drop signal across the reference resistor, in which the measuring current flows through the thermal converter. This makes the output code of the ADC to be independent of the measuring current. The metrological analysis of transformation of the thermal converter resistance difference into the digital code is performed, the revealed sources of errors are the zero-bias voltage of the

© Мамиконян Б. М., 2023

operational amplifier, inaccuracy and instability of the reference resistor. It is established that the considered scheme of the measuring circuit is suitable for use in narrow-limit temperature difference meters. In this case, the communication lines of thermal converters can have any length and do not need the connecting wires resistances to be adjusted.

Keywords: measurement, temperature difference, thermal resistance converter, measuring circuit, measuring current, measuring voltage, reference voltage, measurement error

For citation: Mamikonyan B. M. Metrological analysis of a digital temperature difference meter using thermal resistance converters. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 4. P. 342—349 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-342-349.

Введение. Измерение разности температур широко применяется во многих производствах. Такой подход используется для управления объектом, он позволяет обнаруживать отклонение различных технологических процессов от нормального хода, что трудно выявить посредством измерения температуры контролируемых точек в отдельности. Повышение точности, упрощение схемы и уменьшение эксплуатационных расходов измерителей разности температур особенно важно в холодильных установках, в системах исследования теплопроводности материалов, в химической, пищевой и других отраслях промышленности, в теплоэнергетике, при измерении количества теплоты в водяных системах теплоснабжения, где расход тепловой энергии прямо пропорционален разности температур горячей и холодной воды, протекающей по прямому и обратному трубопроводам.

Объекты исследования. Для измерения разности значений температуры в основном применяются термоэлектрические преобразователи (ТЭП) и платиновые термопреобразователи сопротивления (ПТС). Особенности измерения разности температур посредством ТЭП, области и диапазоны температур их применения, преимущества и недостатки подробно рассмотрены в работах [1—3]. Согласно [4], для различных типов ТЭП предел погрешности измерения температуры θ может находиться в диапазоне от $\pm 1,0$ °С (при низких значениях) до $\pm 0,0075\theta$ (при высоких). Это означает, что предел погрешности измерения ими разности температур может находиться в диапазоне от $\pm 2,0$ °С (при низких температурах) до $\pm 0,0075(\theta_1 + \theta_2)$, здесь θ_1 и θ_2 — температура точек, разность которых подлежит измерению.

По сравнению с ТЭП, ПТС имеют более высокую точность, чувствительность и стабильность метрологических характеристик, поэтому более предпочтительны для измерения малых разностей температур. В большинстве случаев измерение разности температур осуществляется цифровым методом. Возможно раздельное измерение температуры контролируемых точек с последующим определением разности значений или использование прямого метода (например, подключение обоих ПТС по электроизмерительной мостовой схеме и измерение разности их сопротивлений). При этом для повышения точности измерений в качестве датчиков применяются подобранные в пары ПТС, погрешности которых имеют один знак.

При разработке измерительных цепей (ИЦ) цифровых измерителей разности температур с применением ПТС возникают проблемы

1) обеспечения линейности преобразования разности сопротивлений ПТС в выходное напряжение;

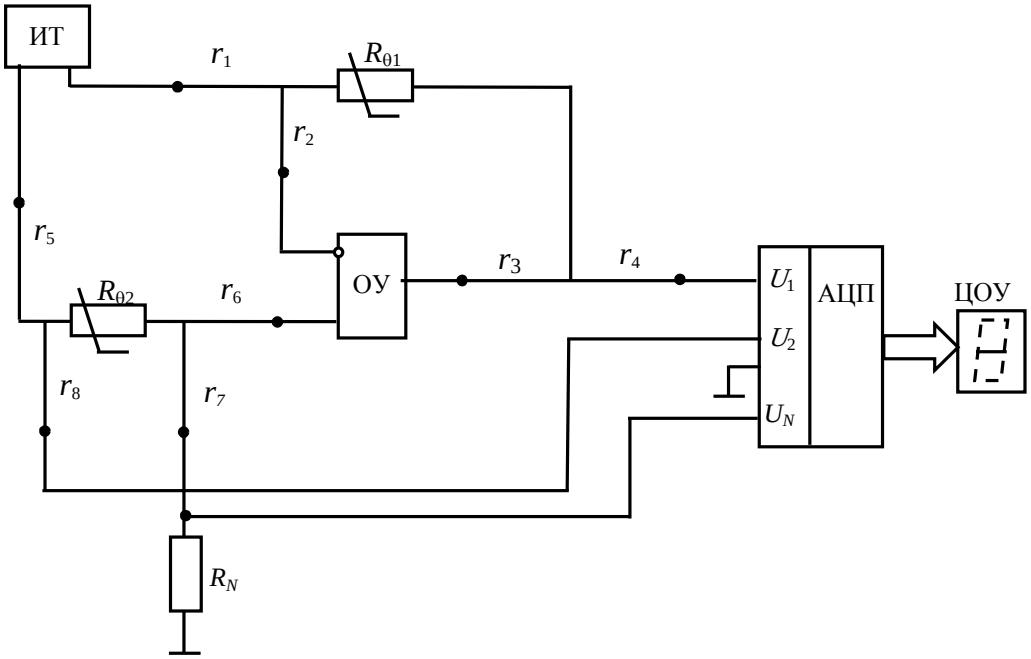
2) исключения влияния нестабильности тока питания ИЦ;

3) исключения влияния изменения сопротивлений проводов соединения ПТС с ИЦ.

Последняя проблема является наиболее сложной. ПТС имеют сравнительно небольшое приращение собственного сопротивления, а длина линии связи (ЛС), соединяющей ПТС с ИЦ, иногда составляет несколько сотен метров, в связи с чем определенное влияние на результат измерения оказывают сопротивления проводов ЛС, а также нестабильность этих сопротивлений. Для исключения (или уменьшения) этого влияния разработано множество

мостовых и дифференциальных схем ИЦ с трехпроводным и четырехпроводным включением ПТС [5—9]. Метрологический анализ показывает, что ИЦ имеют нелинейную характеристику преобразования, сравнительно низкую чувствительность, требуют тщательной подгонки сопротивлений проводов ЛС (погрешность ± 0,01 Ом). Но даже при этом погрешность возникает вследствие изменения сопротивления проводов ЛС, которые обычно выполняются из меди и значительно (иногда соизмеримо с полным приращением сопротивления ПТС в узкопредельных измерителях разности температур) изменяют сопротивление при изменении температуры окружающей среды.

Данная проблема заставляет постоянно совершенствовать схемы ИЦ измерителей разности температур с целью устранения влияния сопротивлений проводов ЛС. Нами разработан [10] измеритель разности температур, в котором ИЦ выполнена по дифференциальной схеме сравнения сопротивлений $R_{\theta 1}$ и $R_{\theta 2}$ ПТС благодаря применению операционного усилителя (ОУ), который создает встречный ток в ПТС $R_{\theta 1}$. В результате на выходе ИЦ получается разность падений напряжений U_1 и U_2 на ПТС (см. рисунок) [10].



ПТС $R_{\theta 1}$ и $R_{\theta 2}$ подключены по четырехпроводной ЛС, сопротивления которых не нуждаются в подгонке, поскольку не влияют на результат измерения. Провода токовых зажимов ПТС r_1, r_3, r_5, r_7 находятся за пределами цепи сравнения напряжений U_1 и U_2. Через провода потенциальных зажимов ПТС r_2, r_4, r_6, r_8 ток не течет из-за больших сопротивлений входов ОУ и АЦП. В результате ПТС $R_{\theta 1}$, $R_{\theta 2}$ и опорный резистор R_N соединены практически последовательно и через них течет один и тот же измерительный ток I источника тока (ИТ).

Выходное напряжение U_1 относительно инвертирующего входа ОУ равно $U_1 = IR_{\theta 1}$, а напряжение U_2 равно $U_2 = IR_{\theta 2}$ относительно неинвертирующего входа ОУ. Полагая потенциалы входов ОУ равными друг другу (с погрешностью напряжения смещения нуля ОУ), получаем $U_1 - U_2 = I\left(R_{\theta 1} - R_{\theta 2}\right)$.

По сравнению с существующими аналогами, рассматриваемый измеритель выгодно отличается простотой и точностью измерения. Кроме ИТ, ОУ, АЦП и цифрового отсчетного устройства (ЦОУ) здесь имеется дополнительно лишь один резистор (R_N), а результат измерения не зависит как от измерительного тока I, так и от сопротивлений проводов ЛС.

Методика исследования. Рассмотрим работу измерителя с ПТС типа 100П, номинальная статическая характеристика которого для диапазона измерений от 0 до 850 °С описывается формулой*

$$R_\theta = R_0 W_\theta = R_0\left(1 + A\theta + B\theta^2\right),$$

где R_θ — сопротивление ПТС, Ом, при температуре θ, °С, $R_0 = 100$ Ом — номинальное сопротивление ПТС при 0°С, $W_\theta = 1 + A\theta + B\theta^2$ — квадратичный полином Каллендара—Ван Дюзена; $A = 3{,}9690 \cdot 10^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -5{,}841 \cdot 10^{-7}\ ^\circ\text{C}^{-2}$; $W_{100} = R_{100}/R_0 = 1{,}3910$.

Если выбрать ПТС с одинаковыми статическими характеристиками, одинаковым начальным сопротивлением (при θ = 0) $R_{01} = R_{02} = R_0$, то для выходного дифференциального напряжения

$$U_\text{В} = U_1 - U_2 = I\left(R_{\theta 1} - R_{\theta 2}\right) = IR_0\left(W_{\theta 1} - W_{\theta 2}\right) = IR_0 A \cdot \Delta\theta. \qquad (1)$$

Поскольку в схеме измеряется разность падений напряжений на ПТС, то влиянием их самонагрева измерительным током на точность измерения можно пренебречь. Для $I = 2{,}6$ мА разности температур $\Delta\theta = 1{,}0$ °С будет соответствовать выходное напряжение

$$U_\text{В} = IR_0 A = 2{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 3{,}9690 \cdot 10^{-3} \approx 1{,}03 \text{ мВ}.$$

Следовательно, если требуется разработать узкопредельный измеритель разности температур, например, $\Delta\theta_m = 20{,}0$ °С, то для нормальной работы АЦП необходимо усиливать выходные напряжения ИЦ хотя бы в десять раз. Если выходные напряжения ИЦ будут поступать на входы АЦП без усиления, необходимо рассматривать достаточно широкий предел измерения разности температур $\Delta\theta_m = 200{,}0$ °С. В этом случае будем иметь максимальное выходное напряжение $U_{\text{В}m} \approx 206$ мВ.

Целесообразно использовать АЦП двухтактного интегрирования на 3,5 десятичных разряда типов КР572ПВ2А либо КР572ПВ5А, погрешность которых меньше единицы низкого разряда кода [11]. Эти микросхемы имеют встроенный дешифратор и драйвер дисплея, благодаря чему напрямую соединяются с семисегментными цифровыми индикаторами. При этом микросхема КР572ПВ2А предназначена для работы с светодиодными индикаторами с общим анодом, а КР572ПВ5А — с жидкокристаллическими индикаторами. В разработке использован АЦП КР572ПВ2А (ICL7107CPLZ). Микросхема имеет следующие основные характеристики: напряжение смещения нуля аналоговой части < 10 мкВ, его температурный дрейф $< 1{,}0$ мкВ/°С, входные токи < 10 пА, линейность коэффициента преобразования $< 0{,}2$ е.м.р., а температурная стабильность $< 5 \cdot 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$, входное сопротивление > 20 МОм. АЦП имеет дифференциальные входы для измерительного и опорного напряжений; это позволяет измерять „плавающие“ напряжения относительно напряжений питания и существенно уменьшить влияние синфазных напряжений на точность измерения.

Выходному коду АЦП соответствует число $N_X = 10^3 U_\text{В}/U_N$, где опорное напряжение $U_N = IR_N$. В результате на выходе АЦП получается цифровой результат измерения в виде

$$N_X = \frac{10^3\left(U_1 - U_2\right)}{U_N} = \frac{10^3\left(R_{\theta 1} - R_{\theta 2}\right)}{R_N} = \frac{10^3 \Delta R_\theta}{R_N} = \frac{10^3 R_0 A}{R_N} \cdot \Delta\theta. \qquad (2)$$

* ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с.

Пределу измерения разности температур $\Delta\theta_m = 200,0$ °С должно соответствовать число $N_{Xm} = 2000$, поэтому из (2) следует

$$2000 = \frac{10^3 R_0 A}{R_N} \cdot \Delta\theta_m = \frac{10^3 \cdot 100 \cdot 3,9690 \cdot 10^{-3} \cdot 200}{R_N},$$

откуда получаем необходимое значение сопротивления опорного резистора $R_N = 39,69$ Ом, а опорное напряжение $U_N = IR_N = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 39,69 \approx 103,2$ мВ.

Для максимального подавления сетевой помехи частота генератора тактовых импульсов АЦП $f_\text{Т}$ выбирается кратной частоте сети 50 Гц из условия [11]

$$4 \cdot 10^3 / f_\text{Т} = 0,02n,$$

где n — целое число. Выбрав $n = 10$, получим

$$f_\text{Т} = 4 \cdot 10^3 / 0,2 = 20 \text{ кГц}.$$

Частота тактовых импульсов АЦП может задаваться с помощью внешней *RC*-цепочки с резистором R_3 и конденсатором C_5, номиналы которых выбираются из соотношения $R_3 C_5 \approx 0,45 / f_\text{Т}$, причем для всех частот рекомендуется применять резистор R_3 с сопротивлением 100 кОм [11]. При этом емкость конденсатора будет равна

$$C_5 = \frac{0,45}{R_3 f_\text{Т}} = \frac{0,45}{100 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3} = 225 \text{ пФ}.$$

Используем в качестве R_3 резистор типа С2-29В-0,125-100 кОм ±0,25%-А-1, а C_5 — конденсатор типа К10-7В-МПО-50*В*-225 пФ±5%, температурный коэффициент емкости которого в диапазоне 0—70 °С составляет $+30 \cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$ [12].

Полный цикл преобразования микросхемы КР572ПВ2А длится 16000 периодов тактовых импульсов, следовательно, длительность одного преобразования составит

$$\tau_\text{П} = 16 \cdot 10^3 / f_\text{Т} = 16 \cdot 10^3 / 20 \cdot 10^3 = 0,8 \text{ с}.$$

В качестве цифровых индикаторов выбраны два семисегментных светодиодных индикатора с десятичной точкой типа АЛС 324Б, суммарный ток питания которых менее 70 мА.

Анализ погрешностей. Из (2) видно, что точность измерения разности сопротивлений ПТС обусловлена точностью и стабильностью напряжений $U_\text{В} = U_1 - U_2$ и U_N, следовательно, абсолютная погрешность измерения представится в виде суммы двух составляющих:

$$\Delta N_X = \frac{\partial N_X}{\partial U_\text{В}} \Delta U_\text{В} + \frac{\partial N_X}{\partial U_N} \Delta U_N,$$

откуда получаем выражение относительной погрешности

$$\delta(N_X) = \Delta(N_X) / N_X = \delta(U_\text{В}) - \delta(U_N). \qquad (3)$$

Погрешностью $\Delta U_\text{В}$ является напряжение смещения нуля ОУ, поскольку точность и стабильность измерительного тока не вызывает погрешности измерения. Выбираем прецизионный ОУ типа К140УД24 (ICL7650) с автоподстройкой нуля по МДМ для низкочастотных сигналов, с коэффициентом усиления $A = 10^6$ и входным сопротивлением $R_\text{вх} = 10^{12}$ Ом, имеющий следующие предельные значения напряжения смещения нуля и его стабильности:

$U_{\text{СМ}} = \pm 5$ мкВ при температуре окружающей среды $T = 20$ °С ; температурный коэффициент напряжения смещения нуля в диапазоне $T = (-55...+85)$ °С — $\alpha_T = \Delta U_{\text{СМ}} / \Delta T = 0,05$ мкВ/°С; коэффициент влияния нестабильности источников питания ($U_{\text{П}} = \pm 4,5...\pm 5,5$ В) на напряжение смещения нуля $K_{\text{ВХ.ИП}} = 1,0$ мкВ/В.

Допустимое изменение напряжения смещения нуля ОУ в нормальных условиях (при 20 ± 5 °С) с учетом того, что если прибор настраивается при температуре 15 или 25 °С, то изменение температуры может быть равно $\Delta t = \pm 10$ °С. Следовательно, напряжение смещения нуля с учетом его температурного дрейфа будет

$$U_{\text{СМ}} + \Delta U_{\text{СМ}}(T) = U_{\text{СМ}} + \alpha_T \cdot 10°\text{С} = 5 + 0,05 \cdot 10 = 5,5 \text{ мкВ}.$$

Изменение напряжения смещения нуля из-за нестабильности напряжения питания ОУ в допустимых пределах $\Delta U_{\text{П}} = \pm 1,0$ В составляет $\Delta U_{\text{СМ}}(\Delta U_{\text{П}}) = \pm 1,0$ мкВ.

Поскольку рассмотренные составляющие случайны и независимы, то суммарное значение напряжения смещения нуля ОУ будет

$$U_{\text{СМ}\Sigma} = \Delta U_{\text{В}} = \sqrt{\left[U_{\text{СМ}} + \Delta U_{\text{СМ}}(T)\right]^2 + \left[\Delta U_{\text{СМ}}(\Delta U_{\text{П}})\right]^2} = \sqrt{5,5^2 + 1,0^2} \approx 5,6 \text{ мкВ}.$$

Следовательно, для предела допускаемой основной приведенной погрешности получаем

$$\gamma(U_{\text{В}}) = \frac{5,6 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{206 \cdot 10^{-3}} = 0,027 \ \%$$

— при $\Delta\theta_m = 200,0$ °С, и $\gamma(U_{\text{В}}) = 0,27$ %

— при $\Delta\theta_m = 20,0$ °С.

Погрешность $\delta(U_N)$ в (3) обусловлена неточностью и нестабильностью сопротивления резистора R_N, поскольку $U_N = IR_N$. В качестве резистора R_N выбираем наиболее распространенный прецизионный тонкопленочный резистор типа С2-29В. Они выпускаются с минимальным допускаемым отклонением от номинального сопротивления ±0,1 % и с минимальным температурным коэффициентом сопротивления $\alpha_T = \pm 25 \cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$*. Определим допустимое изменение сопротивления резистора R_N в нормальных условиях (при температуре $T = 20 \pm 5$ °С):

$$\Delta R_{NT} = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot R_{N\text{Н}} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 10 R_{N\text{Н}} = \pm 2,5 \cdot 10^{-4} R_{N\text{Н}},$$

где $R_{N\text{Н}}$ — номинальное сопротивление резистора. Значит, суммарное абсолютное изменение сопротивления резистора в условиях эксплуатации для допуска ±0,1 % будет

$$\Delta R_{N\Sigma} = 0,001 R_{N\text{Н}} + \Delta R_{Nt} = \pm 12,5 \cdot 10^{-4} R_{N\text{Н}},$$

следовательно, $\delta(R_N) = \delta(U_N) = \Delta R_{N\Sigma} / R_{N\text{Н}} \cdot 100 = 0,125$ %.

При суммировании учитываем, что погрешности $\delta(U_{\text{В}})$ и $\delta(U_N)$ в (3) случайны и независимы, подчиняются нормальному распределению, поэтому предел основной приведенной погрешности с доверительной вероятностью 0,95 определяем по формуле

$$\gamma(N_X) = \sqrt{\left[\gamma(U_{\text{В}})\right]^2 + \left[\delta(U_N)\right]^2},$$

* Прецизионные тонкопленочные резисторы С2-29В ОЖО.467.099 ТУ; ОЖО.467.130 ТУ, http://www.rtkt.ru/files/s2-29v.pdf.

в результате получаем: $\gamma(N_X) \approx 0{,}13$ % при $\Delta\theta_m = 200{,}0$ °C, и $\gamma(N_X) \approx 0{,}3$ % — при $\Delta\theta_m = 20{,}0$ °C. Здесь учтено, что поскольку $\delta(U_N)$ не зависит от диапазона измерения $\Delta\theta_m$, то $\delta(U_N) = \gamma(U_N)$.

Заключение. Оценим полученные результаты. Наиболее жесткие требования к измерительным преобразователям разности температур предъявляются в случае их использования в счетчиках тепловой энергии, в частности — систем квартирного теплоснабжения. Согласно требованиям [13], температура воды в трубе горячего водоснабжения может находиться в диапазоне $40 \le \theta_\Gamma \le 80$ °C, а в трубе холодного водоснабжения — в диапазоне $30 \le \theta_X \le 70$ °C. Следовательно, диапазон разности температур будет $10 \le \Delta\theta \le 50$ °C. При этом предел приведенной погрешности измерения разности температур (без учета погрешности ПТС) не должен превышать $\pm 0{,}2$ °C. Полученный выше результат $\gamma(N_X) \approx 0{,}3$ % означает, что в разработанном измерителе разности температур эта погрешность при $\Delta\theta_m = 20{,}0$ °C не превышает $\pm 0{,}06$ °C, следовательно, измеритель пригоден для использования в счетчиках тепловой энергии систем квартирного теплоснабжения. Отметим также, что измеритель выгодно отличается от аналогов совокупностью следующих свойств, которые следуют из формул (1) и (2):

— обеспечивается линейное преобразование разности сопротивлений ПТС в напряжение, что весьма важно для измерения этого напряжения;

— обеспечивается максимально возможная чувствительность преобразования измеряемой разности температур в напряжение $S = U_\text{В} / (R_{\theta 1} - R_{\theta 2}) = I$;

— исключено влияние на результат измерения сопротивлений проводов ЛС, благодаря чему ЛС может иметь практически любую длину и не нуждаться в подгонке сопротивлений соединительных проводов;

— на результат измерения не влияют изменения измерительного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геращенко О. А., Гордов А. Н., Еремина А. К.* и др. Температурные измерения. Справочник. Киев: Наук. думка, 1989. 704 с.
2. *Крамарухин Ю. Е.* Приборы для измерения температуры. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
3. Industrial temperature measurement. Basics and practice. ABB Automation products GmBH, 2013. 324 p.
4. *Заничковская Л. В.* и др. О методических погрешностях некоторых схем измерения разности температур // Измерительная техника. 1972. № 11. С. 47—49.
5. *Барковский Ю. М., Гаврилов Ю. М.* Совершенствование вторичных приборов для измерения температуры и разности температур // Приборы и системы управления. 1994. № 1. С. 26—27.
6. Пат. РФ 2025675, МПК G01K 3/08 (1990.01). Устройство измерения температуры и разности температур / *В. Д. Смирнов, В. Г. Матвеев*. Заяв. 5057900/10 от 06.08.1992; опубл. 30.12.1994.
7. Пат. АМ 2120, МПК G01K 7/16 (2006.01). Измерительный преобразователь разности температур / *Н. А. Шахкамян, А. С. Шахкамян*. Заяв. AM20070115 от 31.10.2007; опубл. 25.07.2008.
8. Пат. РФ 2405131, МПК G01K 3/08 (2006.01), G01K 7/16 (2006.01). Устройство измерения разности температуры с терморезистивными датчиками / *С. Д. Леонов, А. А. Максимчук, Ю. В. Троицкий*. Заяв. 2009143053/28 от 20.11.2009; опубл. 27.11.2010.
9. Пат. АМ 2571, МПК G01K 7/00 (2009.01). Аналого-цифровой преобразователь разности температур / *Н. А. Шахкамян*. Заяв. № AM20100058 от 17.05.2010, опубл. 25.11.2011.
10. Пат. АМ 3417, МПК G01K 7/00 (2020.01). Электрический преобразователь разности температур / *Б. М. Мамиконян, Х. Б. Мамиконян*. Заяв. AM20200069 от 14.08.2020; опубл. 16.11.2020.

11. *Федорков Б. Г., Телец В. А.* Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

12. Справочник РЭА (резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства). Минск: Беларусь, 1994. 592 с.

13. *Соколов Е. А.* Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоиздат, 1982. 360 с.

Сведения об авторе

Борис Мамиконович Мамиконян — д-р техн. наук, профессор; Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал, кафедра ЭЭИАС; E-mail: gyumri@polytechnic.am

Поступила в редакцию 19.10.22; одобрена после рецензирования 27.12.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Eremina A.K. et al. *Temperaturnyye izmereniya. Spravochnik* (Temperature Measurements. Directory), Kyiv, 1989, 704 p. (in Russ.)
2. Kramarukhin Yu.E. *Pribory dlya izmereniya temperatury* (Temperature Measuring Instruments), Moscow, 1990, 208 p. (in Russ.)
3. *Industrial temperature measurement. Basics and practice*, ABB Automation products GmBH, 2013, 324 p.
4. Zanichkovskaya L.V. et al. *Measurement Techniques*, 1972, no. 11, pp. 47–49. (in Russ.)
5. Barkovsky Yu. M., Gavrilov Yu. M. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 1994, no. 1, pp. 26–27. (in Russ.)
6. Patent RU 2025675, G01K 3/08 (1990.01), *Ustroystvo izmereniya temperatury i raznosti temperatur* (Device for Measuring Temperature and Temperature Difference), V.D. Smirnov, V.G. Matveev, Patent application no. 5057900/10, Priority 06.08.1992, Published 30.12.1994. (in Russ.)
7. Patent AM 2120, G01K 7/16 (2006.01), *Izmeritel'nyy preobrazovatel' raznosti temperatur* (Temperature Difference Measuring Transducer), N.A. Shakhkamyan, A.S. Shahkamyan, Patent application no. AM20070115, Priority 31.10.2007, Published 25.07.2008. (in Russ.)
8. Patent RU 2405131, G01K 3/08 (2006.01), G01K 7/16 (2006.01), *Ustroystvo izmereniya raznosti temperatury s termorezistivnymi datchikami* (Device for Measuring Temperature Difference with Thermoresistive Sensors), S.D. Leonov, A.A. Maksimchuk, Yu.V. Troitskiy, Patent application no. 2009143053/28, Priority 20.11.2009, Published 27.11.2010. (in Russ.)
9. Patent AM 2571, G01K 7/00 (2009.01), *Analogo-tsifrovoy preobrazovatel' raznosti temperatur* (Analog-to-Digital Temperature Difference Converter), N.A. Shahkamyan, Patent application no. AM20100058, Priority 17.05.2010, Published 25.11.2011. (in Russ.)
10. Patent AM 3417, G01K 7/00 (2020.01), *Elektricheskiy preobrazovatel' raznosti temperatur* (Electrical Temperature Difference Transducer), B.M. Mamikonyan, Kh.B. Mamikonyan, Patent application no AM20200069, Priority 14.08.2020, Published 16.11.2020. (in Russ.)
11. Fedorkov B.G., Telets V.A. *Mikroskhemy TSAP i ATSP: funktsionirovaniye, parametry, primeneniye* (DAC and ADC Microcircuits: Operation, Parameters, Application), Moscow, 1990, 320 p. (in Russ.)
12. *Spravochnik REA (rezistory, kondensatory, transformatory, drosseli, kommutatsionnyye ustroystva)* (REA Handbook (Resistors, Capacitors, Transformers, Chokes, Switching Devices)), Minsk, 1994, 592 p. (in Russ.)
13. Sokolov E.A. *Teplofikatsiya i teplovyye seti* (Heat Supply and Heat Networks), Moscow, 1982, 360 p. (in Russ.)

Data on author

Boris M. Mamikonyan — Dr. Sci., Professor; National Polytechnic University of Armenia, Gyumri Branch, Department of EEIAS; E-mail: gyumri@polytechnic.am

Received 19.10.22; approved after reviewing 27.12.22; accepted for publication 28.02.23.