

ISSN 2500—0381
Электронная версия

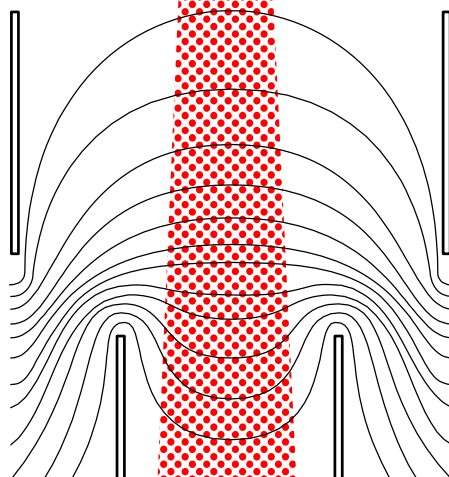
ISSN 0021—3454
Печатная версия

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



№ **2**
Т. 67
2024

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



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
В. В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, 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
Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, Концерн «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЪЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО «ЦРТ-инновации», Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО «Феррум», Санкт-Петербург, Россия
А. Н. МИРОНОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., 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
В. С. СИЗИКОВ, 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
В. Ю. ТЕРТЫЧНЫЙ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 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
В. П. ХОДУНКОВ, канд. техн. наук, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия*

Ответственный секретарь М. В. Лебецкая

Редактор Л. Г. Позднякова

Набор, верстка: М. В. Герасимова

Перевод: Ю. И. Копилевич

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

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

[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)

Подписано в печать 29.02.2024 г.

Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“

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

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

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

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

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

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8.

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



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

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

Журнал содержит следующие разделы:

- информатика и информационные процессы;
- информационно-измерительные и управляющие системы;
- системный анализ, управление и обработка информации;
- приборы навигации;
- вычислительные системы и их элементы;
- оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;
- приборы и методы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды;
- приборы, системы и изделия медицинского назначения;
- проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры;
- метрология и метрологическое обеспечение;
- компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- роботы, мехатроника и робототехнические системы.

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 и таблицы.

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

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

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

Формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType. **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.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

- Стародубцев В. Г., Ткаченко В. В. Формирование множеств пятеричных голд-подобных последовательностей для систем передачи цифровой информации 107
- Емельянов А. А., Коршунов И. Л. Технические риски цифровой трансформации предприятия 116

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Зеленцов В. А. Метод формирования интегральной оценки качества трудноформализуемых объектов .. 122
- Песчанский А. И. Стационарные характеристики системы $M/G/1/m$ с учетом контроля качества обслуживания 133

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Ефремова Е. С., Никитин А. В. Построение, модели формирования и обработки сигналов системы измерения воздушных параметров с интегрированным фюзеляжным приемником потока 145

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Мамедов Дж. Ф., Мурадлы З. М., Салманов М. С. Инструментарий для эскизного проектирования на этапах разработки системы управления гибким производственным участком 153

ПРИБОРЫ НАВИГАЦИИ

- Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Результаты экспериментальной обработки фазовых измерений системы ГЛОНАСС с использованием бесперебойного алгоритма разрешения целочисленной неоднозначности для высокоточного абсолютного местоопределения 162

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

- Попов Е. Э., Виткин В. В. Влияние давления на результаты измерения объемных долей газовых компонентов методом спектроскопии комбинационного рассеяния 171

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

- Кулак С. М., Нерадовский Д. Ф., Проботюк В. В. Закономерности распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности подземного магистрального газопровода и упругоизогнутой трубы... 178
- Вагин А. В., Воротынцева А. С. Волновые процессы в средах с цилиндрическими поверхностями при условии жесткого контакта 186

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Дмитриев В. А., Марусина М. Я. Особенности построения бонд-графа шагающих роботов 195
- Скобцов В. Ю., Соколов Б. В., Чжан В.-А., Фу М. Гибридные нейросетевые модели мониторинга данных временных рядов сложных объектов..... 200

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
EFIMOV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
KHODUNKOV VYACHESLAV, PhD, D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, 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
LITVINENKO YULIA, PhD, Concern CSRI Electropribor, JSC, 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
MIRONOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., 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
SIZIKOV VALERY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., SRI OEP, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TERTYCHNY VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, 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., IPMash 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

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 67

FEBRUARY 2024

№ 2

CONTENTS

INFORMATICS AND INFORMATION PROCESSING

- Starodubtsev V. G., Tkachenko V. V. Formation of Sets of Five-Fold Gold-Type Sequences for Digital Information Transmission Systems 107
- Emelyanov A. A., Korshunov I. L. Enterprise Technical Risks Associated with Digital Transformation 116

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Zelentsov V. A. Method for Creating an Integral Assessment of the Quality of Difficult-to-Formalize Object 122
- Peschansky A. I. Stationary Characteristics of the M/G/1/m Queuing System with Regard to Service Quality Control 133

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Soldatkin V. M., Soldatkin V. V., Efremova E. S., Nikitin A. V. Construction, Modeling of Signal Formation and Processing for Air Parameters Measuring System with the Integrated Fuselage Flow Receiver 145

COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

- Mammadov J. F., Muradli Z. M., Salmanov M. S. Toolkit for Preliminary Design at the Stages of Developing a Control System for a Flexible Production Area 153

NAVIGATIONAL INSTRUMENTS

- Bakholdin V. S., Lekontsev D. A. Results of Experimental Processing of Phase Measurements of the GLONASS System Using a Non-Brute Force Integer Ambiguity Resolution Algorithm for High-Precision Absolute Location 162

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND COMPLEXES

- Popov E. E., Vitkin V. V. Influence of Pressure on the Results of Measuring the Volume Fractions of Gas Components Using Raman Spectroscopy 171

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

- Kulak S. M., Neradovsky D. F., Probotyuk V. V. Patterns of Magnetic Stray Field Distribution Along the Surface of an Underground Main Gas Pipeline and an Elastically Bent Pipe 178
- Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Wave Processes in Media with Cylindrical Surfaces Under Rigid Contact 186

BRIEF NOTES

- Dmitriev V. A., Marusina M. Ya. Features of Constructing a Bond Graph of Walking Robots 195
- Skobtsov V. Yu., Sokolov B. V., Zhang W.-A., Fu M. Hybrid Neural Network Models for Monitoring Time Series Data of Complex Objects 200

To the Authors!

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

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

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

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

Submission includes two copies of:

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

— extended abstract (150—250 words);

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

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

— the recommendation of the Department (laboratory);

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

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

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

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

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

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

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

Editorial Staff

ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВ ПЯТЕРИЧНЫХ ГОЛД-ПОДОБНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. Г. СТАРОДУБЦЕВ*, В. В. ТКАЧЕНКО

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

* vka@mil.ru

Аннотация. Представлены наборы векторов индексов децимации $\mathbf{I}_S = (i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$, на основе которых формируются множества пятеричных голд-подобных последовательностей в конечных полях $\text{GF}(5^S)$ ($S = 3, 4, 5, 6$) на основе М-последовательностей с проверочными полиномами $h_{\text{МП}}(x)$ для периодов $N = 5^S - 1 < 20\,000$. Наборы включают как известные индексы децимации, полученные в работах Трахтенберга, Хеллесета, Кумара и удовлетворяющие условию $\text{НОД}(i_{di}, 5^S - 1) = 1$ (НОД — наибольший общий делитель), так и вновь полученные индексы, позволяющие формировать множества пятеричных голд-подобных последовательностей объема $V_S = N + 1$ с низким уровнем значений периодической взаимно корреляционной и автокорреляционной функций. Для рассмотренных значений S приведены граничные оценки максимального значения модуля корреляционной функции $|R_{\max}|$.

Ключевые слова: конечное поле, последовательность Голда, корреляционная функция, М-последовательность, индекс децимации

Ссылка для цитирования: Стародубцев В. Г., Ткаченко В. В. Формирование множеств пятеричных голд-подобных последовательностей для систем передачи цифровой информации // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 107—115. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-107-115.

FORMATION OF SETS OF FIVE-FOLD GOLD-TYPE SEQUENCES
FOR DIGITAL INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS

V. G. Starodubtsev*, V. V. Tkachenko

A. F. Mozhaitsky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

* vka@mil.ru

Abstract. Sets of vectors of decimation indices $\mathbf{I}_S = (i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$ for the formation of sets of five-fold Gold-type sequences in finite fields $\text{GF}(5^S)$ ($S = 3, 4, 5, 6$) based on M-sequences with verification polynomials $h_{\text{MP}}(x)$ for periods $N = 5^S - 1 < 20\,000$, are presented. The sets include both the well-known decimation indices obtained by Trachtenberg, Hellestet, Kumar and satisfying the condition $\text{LCD}(i_{di}, 5^S - 1) = 1$ (LCD is the largest common divisor), and the newly found indices that allow the formation of sets of five-fold Gold-type sequences with volumes $V_S = N + 1$ and low levels of periodic auto- and the cross-correlation functions. For the considered values of S , boundary estimates of the maximum value of the correlation function modulus $|R_{\max}|$ are given.

Keywords: finite fields, Gold sequences, correlation function, M-sequences, decimation indices

For citation: Starodubtsev V. G., Tkachenko V. V. Formation of sets of five-fold Gold-type sequences for digital information transmission systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 107—115 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-107-115.

Одним из направлений повышения защищенности систем передачи цифровой информации (СПЦИ) по каналам спутниковой связи от преднамеренных помех является применение фазоманипулированных сигналов с расширенным спектром (СРС), формируемых на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП) [1, 2]. В настоящее время в основном используются двоичные ПСП, в качестве которых выступают как непосредственно М-последовательности (МП), так и производные последовательности, формируемые на их основе путем децимации символов МП, например, последовательности Голда, Касами или Гордона—Миллса—Велча [3—6].

Переход от двоичных к недвоичным фазоманипулированным СРС на основе пятеричных голд-подобных последовательностей (ГПП) позволяет увеличить число множеств сигналов с эквивалентными корреляционными свойствами при сопоставимых периодах, что обеспечивает повышение структурной скрытности передаваемых сигналов в СПЦИ.

Основными характеристиками множеств синтезируемых ПСП являются максимальное значение модуля периодической взаимно корреляционной функции (ПВКФ) $|R_{\max}|$ и объем множества V_S . При синтезе множеств ПСП стремятся к снижению $|R_{\max}|$ и увеличению V_S .

Разработке алгоритмов формирования множеств двоичных и недвоичных последовательностей с хорошими автокорреляционными и взаимно корреляционными свойствами посвящено большое число публикаций [6—14]. В [6] показано, что множества двоичных последовательностей Голда образуются на основе предпочтительных пар МП, имеющих трехуровневую ПВКФ при нечетных значениях S и четных $S = 2 \bmod 4$, а также четырехуровневую ПВКФ — при четных значениях $S = 0 \bmod 4$.

При формировании множеств недвоичных последовательностей с низким уровнем взаимной корреляции также используются предпочтительные пары недвоичных МП. При этом число уровней ПВКФ может увеличиваться. В [7—9] для полей $GF(p^S)$ при нечетных значениях S получены индексы децимации недвоичных МП, на основе которых определяются предпочтительные пары МП при формировании множеств ГПП. В работах [10—14] проанализирована взаимная корреляция p -ичных МП с последовательностями, полученными путем их децимации.

Целью настоящей статьи является определение в полях $GF(5^S)$ при $S = 3, 4, 5, 6$ векторов индексов децимации $\mathbf{I}_S = (i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$, на основе которых формируются множества ГПП с низким уровнем взаимной корреляции.

Для нечетных значений S максимальное значение модуля корреляционной функции удовлетворяет граничной оценке, полученной в [7]:

$$|R_{\max}| = 1 + p^{(S+1)/2}. \quad (1)$$

Для четных значений S получены граничные оценки модуля ПВКФ множеств ГПП:

$$|R_{\max}| = -1 + k5^{S/2}, \quad k = 2, 3, 4, 5. \quad (2)$$

Пятеричные МП с периодом $N = 5^S - 1$ формируются над конечными полями $GF(5^S)$. Символы d_i ($i = 0, \dots, N - 1$) МП в каноническом виде определяются выражением [2, 6, 13]:

$$d_i = \text{tr}_{S1}(\alpha^i), \quad (3)$$

где $\text{tr}_{S1}(\alpha)$ — функция следа примитивного элемента α из поля $GF(5^S)$ в поле $GF(5)$.

При исследовании корреляционных свойств СРС наибольшее распространение получили периодические автокорреляционные функции (ПАКФ) и ПВКФ при циклическом сдвиге сигналов. Известно, что корреляционные свойства СРС полностью определяются корреляционными свойствами ПСП [2—6].

Форма представления элементов последовательностей A_i определяет вид пространства, в котором вычисляется корреляционная функция, и способ нахождения расстояния между сигнальными точками, т.е. метрику пространства.

Если элемент $a_{li} = \exp(j2\pi i/3)$ ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) последовательности A_l принадлежит пятеричному комплекснозначному алфавиту, то используется метрика в евклидовом пространстве. При этом для вычисления ПАКФ и ПВКФ последовательностей A_l и A_k с периодом N справедливы следующие выражения [1, 2, 5, 6]:

$$\begin{aligned} R_{ll}(\tau) &= \sum_{t=0}^{N-1} a_{lt} a_{l,t+\tau}^* ; \\ R_{lk}(\tau) &= \sum_{t=0}^{N-1} a_{lt} a_{k,t+\tau}^* , \end{aligned} \quad (4)$$

где $a_{l,t+\tau}^*$ — комплексно сопряженный элемент; τ — циклический сдвиг, принимающий дискретные значения; сдвиг $(l + \tau)$ вычисляется по mod N .

Если элемент a_{ji} принадлежит простому полю $GF(p) = (0, 1, \dots, p-1)$, то используется метрика Хемминга при $p = 2$ или метрика Ли при $p > 2$. При этом расстояния между элементами i и j в метрике Хемминга и метрике Ли определяются выражениями

$$d_{\text{ХМ}}(i, j) = (i + j) \bmod 2 = i \oplus j; \quad (5)$$

$$d_{\text{Ли}}(i, j) = \begin{cases} |i - j|, & \text{если } |i - j| \leq p/2, \\ p - |i - j|, & \text{если } |i - j| > p/2. \end{cases} \quad (6)$$

Можно дать следующую интерпретацию расстоянию Ли между двумя элементами. Если p элементов равномерно расположить на окружности в порядке возрастания их номеров от 0 до $p - 1$, то расстояние Ли определяется числом участков окружности при движении от одного элемента к другому по кратчайшей дуге.

При формировании пятеричных множеств ГПП целесообразно использовать представление элементов в конечных полях. При вычислении корреляционных функций ПСП и соответственно СРС используется метрика в евклидовом пространстве.

Рассмотрим формирование ГПП для нечетных значений $S = 3, 5$.

Пятеричные последовательности для $S = 3$ с периодом $N = 5^3 - 1 = 124$ формируются в конечном поле $GF(5^3)$ с примитивным полиномом $f(x) = h_1(x) = x^3 + 3x + 2$. В поле $GF(5^3)$ имеется двадцать примитивных полиномов с индексами децимации i_{dj} ($j = 1, 2, \dots, 20$) символов базисной МП, формируемой на основе $h_1(x)$: 1, 3, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 21, 23, 33, 37, 39, 43, 47, 49, 63, 69, 73, 99.

Индексы децимации соответствуют нижним индексам в полиномах $h_i(x)$ и являются минимальными показателями степени корней данных полиномов. Все МП в поле $GF(5^3)$ могут быть получены путем децимации символов базисной МП по данным индексам. Например, МП, образованная из базисной МП по индексу децимации $i_{d7} = 17$, имеет проверочный полином $h_{17}(x) = x^3 + 4x + 2$.

Примитивные полиномы в поле $GF(5^3)$ приведены в табл. 1 в виде коэффициентов при переменной x для соответствующих индексов децимации. Например, полином $h_{17}(x) = x^3 + 4x + 2$ записывается как 1042.

Таблица 1

Примитивные полиномы в поле $GF(5^3)$ с $f(x) = x^3 + 3x + 2$

i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j
1	1032	11	1323	21	1242	39	1203	63	1033
3	1143	13	1442	23	1043	43	1343	69	1412
7	1113	17	1042	33	1312	47	1223	73	1222
9	1302	19	1213	37	1102	49	1322	99	1403

Множество пятеричных ГПП формируется на основе предпочтительных пар (ПП) МП [6]. Для определения ПП МП с периодом $N = 124$ проанализированы взаимно

корреляционные свойства МП с проверочным полиномом $h_1(x) = x^3 + 3x + 2$ и остальных девятнадцати МП. Условию (1) удовлетворяют две МП с индексами $i_{d1} = 13$, $i_{d2} = 21$ и проверочными полиномами $h_{13}(x) = x^3 + 4x^2 + 4x + 2$, $h_{21}(x) = x^3 + 2x^2 + 4x + 2$, обладающие трехуровневой ПВКФ:

$$R(\tau) = (-26, -1, 24). \quad (7)$$

Таким образом, для полинома $h_1(x)$ имеются две ПП ПМ: $h_1(x) \rightarrow h_{13}(x)$ и $h_1(x) \rightarrow h_{21}(x)$. На основании ПП МП формируются множества пятеричных ГПП, проверочные полиномы которых $h_{ГПП}(x)$ равны произведению проверочных полиномов ПП МП. Например, $h_{ГПП1}(x) = h_1(x)h_{13}(x)$, $h_{ГПП2}(x) = h_1(x)h_{21}(x)$ [14].

С целью формирования проверочного полинома ГПП для произвольного примитивного полинома необходимо индексы множителей полинома $h_{ГПП1}(x)$ или $h_{ГПП2}(x)$ умножить на индекс произвольного по mod N . Например, для $h_{73}(x)$ проверочные полиномы ГПП равны $h_{ГПП3}(x) = h_{73}(x)h_{33}(x)$, $h_{ГПП4}(x) = h_{73}(x)h_9(x)$. На рис. 1 показан график ГПП с полиномом $h_{ГПП4}(x) = h_{73}(x)h_9(x)$.

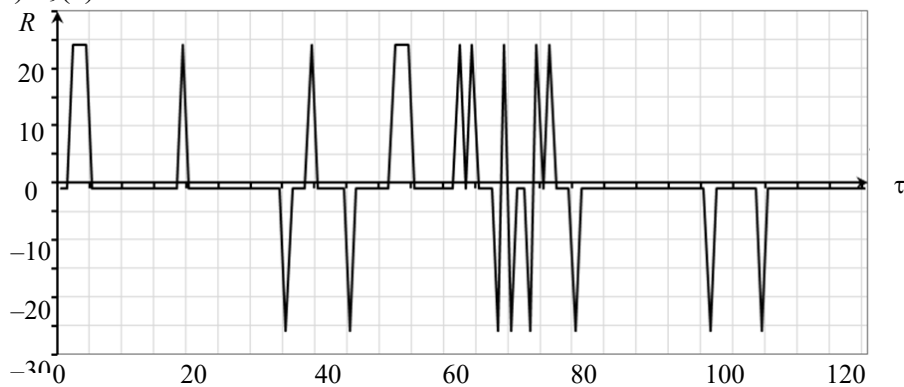


Рис. 1

Таким образом, при $S = 3$ вектор индексов децимации для формирования множеств пятеричных ГПП имеет вид

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{I}_3 = (13, 21), \quad (8)$$

что соответствует результатам, полученным в [7, 8].

Для каждого примитивного полинома поля $GF(5^3)$ можно сформировать по два множества с трехуровневой ПВКФ. Всего можно синтезировать $M_S = M_3 = 40$ множеств ГПП с объемом, аналогичным случаям $p = 2$ и 3 [6]:

$$V_S = V_3 = N + 2 = 126. \quad (9)$$

Синтез множеств пятеричных ГПП может быть выполнен как аппаратным, так и программным способом.

Аппаратная реализация устройства формирования пятеричных ГПП представляет собой совокупность двух регистров сдвига с линейной обратной связью, сумматоры и умножители по mod 5 в цепи обратной связи которых расставляются в соответствии с коэффициентами примитивных полиномов. На рис. 2 показана схема устройства формирования множества ГПП с проверочным полиномом $h_{ГПП4}(x) = h_{73}(x) \cdot h_9(x)$.

Первый регистр формируется в соответствии с полиномом $h_{73}(x) = x^3 + 2x^2 + 2x + 2$, а второй — в соответствии с $h_9(x) = x^3 + 3x^2 + 2$. Ячейки (Я) регистра сдвига представляют собой устройства, которые могут находиться в пяти состояниях и строиться с помощью трех триггеров. В первом регистре выставляется фиксированное ненулевое начальное состояние, во втором для получения всех последовательностей множества ГПП поочередно выставляются все возможные начальные состояния. На схеме в качестве начальных состояний регистров используются первые три символа канонической формы записи МП с полиномами $h_{73}(x)$ и $h_9(x)$ на основе символов d_i базисной МП вида (3) с полиномом $h_1(x)$. Коэффициенты умножения в умножителях по mod 5 равны обратным по сложению коэффициентам h_i примитив-

ных полиномов. Символы с выходов регистров поступают на сумматор по mod 5, являющийся выходом устройства.

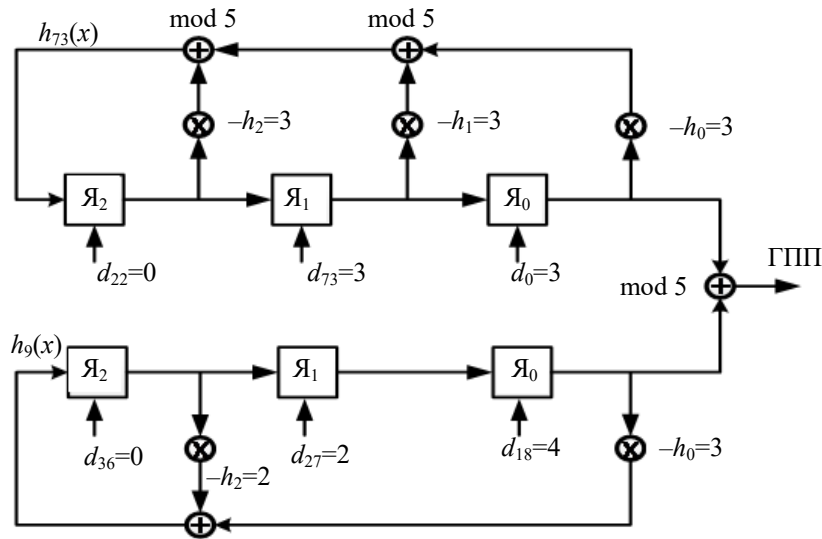


Рис. 2

Для программной реализации процедуры формирования множества ГПП требуется знать символы d_i базисной МП в соответствии с (3) и индексы децимации i_{dj} вида (8) соответствующих множителей проверочного полинома $h_{ГПП}(x)$.

Например, произвольная j -я последовательность ($j = 0, \dots, 123$) из множества ГПП объемом $V_3 = N + 2 = 126$ с $h_{ГПП}(x) = h_{73}(x) \cdot h_9(x)$ формируется из символов d_i базисной МП в соответствии с выражением

$$d_{ГППi} = (d_{73i \bmod 124} + d_{9(i+j) \bmod 124}) \bmod 5, i = 0, \dots, 123. \quad (10)$$

Первое слагаемое в (10) отвечает за формирование МП с фиксированным начальным состоянием и индексом децимации $i_d = 73$, второе — за формирование МП с произвольным сдвигом j и индексом $i_d = 9$. В множество ГПП непосредственно входят МП с полиномами $h_{73}(x)$ и $h_9(x)$.

Пятеричные последовательности множества ГПП для $S = 5$ с периодом $N = 5^5 - 1 = 3124$ формируются в конечном поле $GF(5^5)$ с примитивным полиномом $f(x) = h_1(x) = x^5 + 4x + 2$. В поле $GF(5^3)$ имеется двести восемьдесят примитивных полиномов с индексами децимации i_{dj} ($j = 1, 2, \dots, 280$) символов базисной МП, формируемой на основе $h_1(x)$: 1, 3, 7, 9, 13, 17, 19, 21, 23, 27, ..., 1739, 1743, 1823, 1843, 1849, 1869, 1873, 2349, 2369, 2499 (приведено по десять первых и последних индексов).

Примитивные полиномы в поле $GF(5^5)$ для перечисленных выше индексов децимации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Примитивные полиномы в поле $GF(5^5)$ с $f(x) = x^5 + 4x + 2$

i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i
1		13	113412	23	130313	1823	110333	1873	123402
3	100143	17	142022	27	103233	1843	131243	2349	102202
7	102413	19	122333	1739	141023	1849	140102	2369	102302
9	133032	21	120242	1743	112433	1869	114102	2499	120003

На основе анализа взаимно корреляционных свойств МП были получены как известные индексы децимации $i_{d1} = 13$, $i_{d2} = 21$, $i_{d3} = 149$, $i_{d4} = 313$ [7, 8], так и новые $i_{d5} = 481$, $i_{d6} = 521$, на основе которых формируются ПП МП и соответственно множества ГПП с периодом $N = 3124$.

Общий вектор индексов децимации имеет вид

$$\mathbf{I}_5 = (13, 21, 149, 313, 481, 521). \quad (11)$$

Все ПП МП, а также последовательности множества ГПП обладают ПВКФ, которая принимает три значения:

$$R(\tau) = [-126, -1, 124]. \quad (12)$$

На рис. 3 показан фрагмент ПВКФ длиной 150 символов множества ГПП с $h_{\text{ГПП}}(x) = h_1(x) h_{521}(x)$.

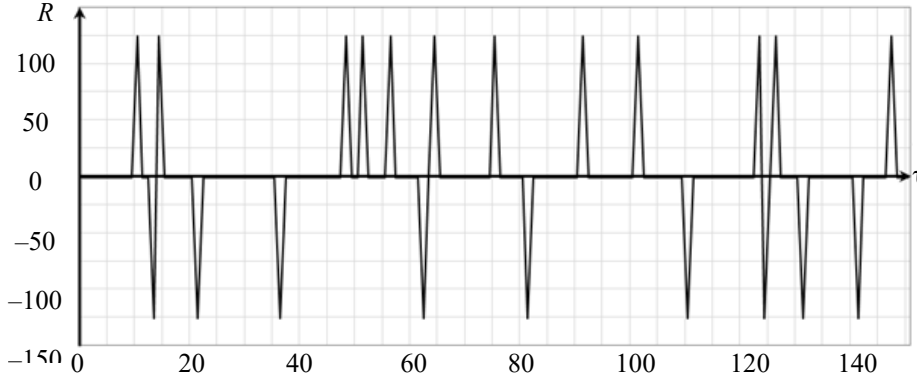


Рис. 3

Всего можно сформировать $M_5 = 1120$ множеств ГПП с периодом $N = 3124$, каждое из которых включает 3124 последовательности с $h_{\text{ГПП}}(x)$ и две „чистых“ МП:

$$V_5 = N + 2 = 3126. \quad (13)$$

В общем случае выражения (7), (12) для ПВКФ и выражения (9), (13) для объема множеств ГПП при нечетных значениях $S = 3, 5$ имеют вид

$$R_{\text{ГПП}}(\tau) = [(-5^{(S+1)/2} - 1); -1; (5^{(S+1)/2} - 1)], \quad (14)$$

$$V_S = 5^S + 1 = N + 2. \quad (15)$$

Максимальное значение ПВКФ в (12) удовлетворяет условию (1).

Рассмотрим процедуру формирования множеств ГПП для четных значений $S = 4, 6$.

Множества пятеричных ГПП для $S = 4$ с периодом $N = 5^4 - 1 = 624$ формируются в конечном поле $\text{GF}(5^4)$ с примитивным полиномом $f(x) = h_1(x) = x^4 + x^2 + 2x + 2$. В поле $\text{GF}(5^4)$ имеется 48 примитивных полиномов с индексами децимации i_{dj} , 18 из которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Примитивные полиномы в поле $\text{GF}(5^4)$ с $f(x) = x^4 + x^2 + 2x + 2$

i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j	i_{dj}	f_j
1	10122	17	11212	29	13302	239	11113	323	10133	373	120022
7	11013	19	13023	31	12203	313	10132	343	13203	469	10442
11	10123	23	13043	37	11202	319	14043	349	14202	499	11303

Анализ взаимно корреляционных свойств МП при $S = 4$ показал, что ПВКФ ПП МП, а также множеств ГПП является четырехуровневой и достигается при двух индексах децимации $i_{d1} = 49, i_{d2} = 217$:

$$R(\tau) = [-26, -1, 24, 49]. \quad (16)$$

На рис. 4 показан фрагмент ПВКФ длиной 125 символов множества ГПП с периодом $N = 624$ и полиномом $h_{\text{ГПП}}(x) = h_1(x) h_{49}(x)$.

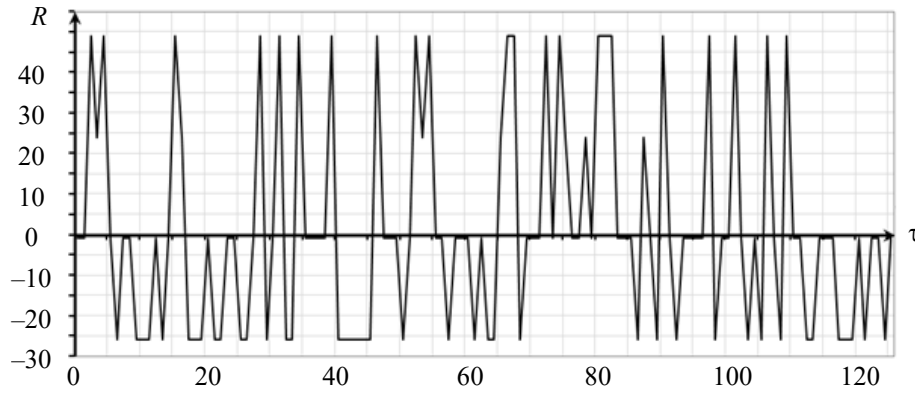


Рис. 4

Всего можно сформировать $M_4 = 96$ множеств ГПП с периодом $N = 624$ объемом

$$V_4 = N + 2 = 626. \quad (17)$$

Множества пятеричных ГПП для $S = 6$ с периодом $N = 5^6 - 1 = 15\,624$ формируются в конечном поле $\text{GF}(5^6)$ с примитивным полиномом $f(x) = h_1(x) = x^6 + x^2 + 2x + 2$. В поле $\text{GF}(5^6)$ имеется 720 примитивных полиномов с индексами децимации i_{dj} , 12 из которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Примитивные полиномы в поле $\text{GF}(5^6)$ с $f(x) = x^6 + x^2 + 2x + 2$

i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i	i_{dj}	f_i
1	1000122	13	1143012	19	1010343	9343	1440203	11719	1000113	11869	1223202
11	1113023	17	1241342	23	1314323	9349	1012422	11849	1043132	12499	1130003

Анализ взаимно корреляционных свойств МП при $S = 6$ показал, что существует два типа ПП МП. Первый тип обладает трехуровневой ПВКФ, которая формируется при двух индексах децимации $i_{d1} = 313$, $i_{d2} = 601$:

$$R_1(\tau) = [-1 - 5^{S/2+1}, -1, -1 + 5^{S/2+1}] = [-626, -1, 624]. \quad (18)$$

Максимальное значение модуля ПВКФ удовлетворяет граничной оценке (2) при $k = 5$:

$$|R_{\max}|_1 = 1 + p^{S/2+1} = 626. \quad (19)$$

Формируемые при этом множества будем обозначать ГПП₁.

Второй тип обладает шестиуровневой ПВКФ, которая формируется при четырех индексах децимации $i_{d3} = 253$, $i_{d4} = 373$, $i_{d5} = 397$, $i_{d6} = 4093$:

$$R_2(\tau) = [-1 - 5^{S/2}, -1, -1 + 5^{S/2}, -1 + 2 \cdot 5^{S/2}, -1 + 3 \cdot 5^{S/2}, -1 + 4 \cdot 5^{S/2}] = [-126, -1, 124, 249, 374, 499]. \quad (20)$$

Формируемые при этом множества обозначаются ГПП₂, максимальное значение модуля ПВКФ соответствует оценке (2) при $k = 4$:

$$|R_{\max}|_2 = -1 + 4 \cdot 5^{S/2} = 499. \quad (21)$$

На рис. 5 показан фрагмент шестиуровневой ПВКФ длиной 125 символов множества ГПП₂ с периодом $N = 15\,624$ и полиномом $h_{\text{ГПП2}}(x) = h_1(x) h_{397}(x)$.

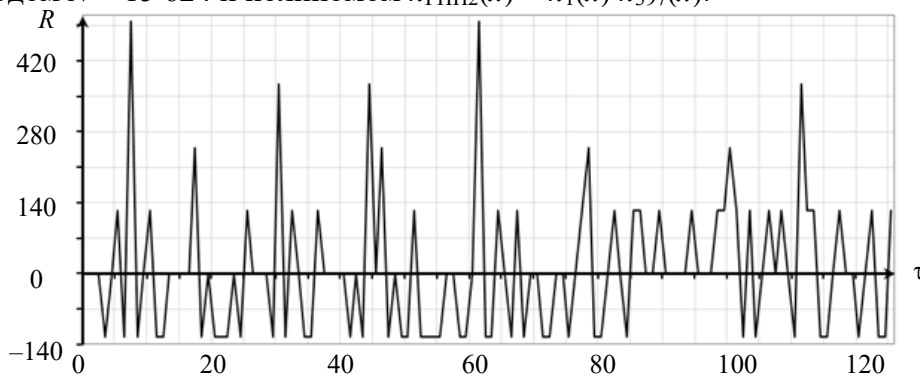


Рис. 5

Всего можно сформировать $M_{6,1} = 1440$ множеств ГПП1 и $M_{6,2} = 2880$ множеств ГПП2 с периодом $N = 16\,624$ и объемом

$$V_6 = N + 2 = 16\,626. \quad (22)$$

Основные корреляционные и мощностные характеристики множеств ГПП приведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики пятеричных множеств ГПП

S	N	Индексы децимации		$ R_{\max} $	$ R_{\max} /N$	Значения ПБКФ	V_S	M_S
		известные	новые					
3	124	13, 21		26	0,21	-26, -1, 24	126	40
4	624		49, 217	49	0,08	-26, -1, 24, 49	96	626
5	3124	13, 21, 149, 313	481, 521	126	0,04	-126, -1, 124	1120	3126
6	15624		313, 601	626	0,04	-626, -1, 624	15626	1440
6	15624		253, 373, 397, 4093	499	0,03	-126, -1, 124, 249, 374, 499	15626	2880

Таким образом, в статье получены векторы индексов децимации $\mathbf{I}_S = (i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn})$, на основе которых формируются множества пятеричных ГПП в конечных полях $\text{GF}(5^S)$ для периодов $N = 5^S - 1 < 20\,000$. Для нечетных значений $S = 3, 5$ ПБКФ множеств ГПП удовлетворяет граничной оценке $|R_{\max}| = 1 + p^{(S+1)/2}$, полученной в [7, 8]. Для значения $S = 4$ граничная оценка четырехуровневой ПБКФ равна $|R_{\max}| = -1 + 2p^{S/2}$. Для $S = 6$ существуют две граничные оценки: $|R_{\max}|_1 = -1 + p^{S/2+1}$ для трехуровневой ПБКФ и $|R_{\max}|_2 = -1 + 4p^{S/2}$ — для шестиуровневой ПБКФ.

Полученные множества ГПП могут быть использованы в СПЦИ в режиме кодового многостанционного доступа при формировании пятеричных фазоманипулированных сигналов с расширенным спектром, а также для синтеза производных систем сигналов, допускающих аналитическое представление в конечных полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
3. Golomb S. W., Gong G. Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar. Cambridge University Press, 2005. 438 p.
4. Yang Y., Tang X. Generic Construction of Binary Sequences of Period $2N$ With Optimal Odd Correlation Magnitude Based on Quaternary Sequences of Odd Period N // IEEE Trans. Inf. Theory. 2018. Vol. 64, N 1. P. 384.
5. CDMA: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. Л. Е. Варакина и Ю. С. Шинакова. М.: МАС, 2003. 608 с.
6. Gold R. Maximal recursive sequences with 3-valued recursive cross-correlation functions // IEEE Trans. Inf. Theory. 1968. Vol. 14, N 1. P. 154.
7. Trachtenberg H.M. On the cross-correlation functions of maximal recurring sequences. Ph.D. dissertation. Univ. Southern California, Los Angeles, CA, 1970.
8. Dobbertin H., Hellesteth T., Kumar P. V., Martinsen H. Ternary M-sequences with three-valued cross-correlation function: New decimations of Welch and Niho type // IEEE Trans. Inf. Theory. 2001. Vol. 47, N 4. P. 1473.
9. Стародубцев В. Г., Мышко В. В. Формирование множеств троичных голд-подобных последовательностей для систем передачи и обработки цифровой информации // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 568—575.
10. Muller E. N. On the cross-correlation of sequences over $\text{GF}(p)$ with short periods // IEEE Trans. Inf. Theory. 1999. Vol. 45, N 1. P. 289.

11. Hu Z., Li X., Mills D., Muller E., Sun W., Williams W., Yang Y., Zhang Z. On the cross-correlation of sequences with the decimation factor $d=(p^n+1)/(p+1)-(p^n-1)/2$ // *Applicable Algebra Eng. Commun. Comput.* 2001. Vol. 12. P. 255.
12. Seo E. Y., Kim Y. S., No J. S., Shin D. J. Cross-correlation distribution of p-ary m-sequence of period $p^{4k}-1$ and its decimated sequences by $((p^{2k}+1)/2)$ // *IEEE Trans. Inf. Theory*. 2008. Vol. 54, N 7. P. 3140.
13. Seo E. Y., Kim Y. S., No J. S., Shin D. J. Cross-correlation distribution of p-ary m-sequence and its $(p+1)$ decimated sequences with shorter period // *IEICE Trans. Fund. Electron., Commun. Comput. Sci.* 2007. Vol. E90-A, N 11. P. 2568.
14. Jang J. W., Kim Y. S., No J. S., Helleseth T. New family of p-ary sequences with optimal correlation property and large linear span // *IEEE Trans. Inf. Theory*. 2004. Vol. 50, N 8. P. 1839.

Сведения об авторах

- Виктор Геннадьевич Стародубцев** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств; преподаватель; E-mail: vgstarod@mail.ru
- Владимир Викторович Ткаченко** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств; старший преподаватель; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 15.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, 2001, 1079 p.
2. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*, NY, John Wiley and Sons Ltd., 2005, 488 p.
3. Golomb S.W., Gong G. *Signal Design for Good Correlation for Wireless Communication, Cryptography and Radar*, Cambridge University Press, 2005, 438 p.
4. Yang Y., Tang X. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2018, no. 1(64), pp. 384.
5. Varakin L.E. and Shinakov Yu.S., ed., *CDMA: proshloe, nastoyashchee, budushchee* (CDMA: Past, Present, Future), Moscow, 2003, 608 p. (in Russ.)
6. Gold R. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1968, no. 1(14), pp. 154.
7. Trachtenberg H.M. *On the cross-correlation functions of maximal recurring sequences*, Candidate's thesis, Univ. Southern California, Los Angeles, CA, 1970.
8. Dobbertin H., Helleseth T., Kumar P.V., Martinsen H. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2001, no. 4(47), pp. 1473.
9. Starodubtsev V.G., Myshko V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 7(66), pp. 568–575. (in Russ.)
10. Muller E.N. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1999, no. 1(45), pp. 289.
11. Hu Z., Li X., Mills D., Muller E., Sun W., Williams W., Yang Y., Zhang Z. *Applicable Algebra Eng. Commun. Comput.*, 2001, vol. 12, p. 255.
12. Seo E.Y., Kim Y.S., No J.S., Shin D.J. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2008, no. 7(54), pp. 3140.
13. Seo E.Y., Kim Y.S., No J.S., Shin D.J. *IEICE Trans. Fund. Electron., Commun. Comput. Sci.*, 2007, no. 11(E90-A), pp. 2568.
14. Jang J.W., Kim Y.S., No J.S., Helleseth T. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2004, no. 8(50), pp. 1839.

Data on authors

- Victor G. Starodubtsev** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Technologies and Automation Tools for Processing and Analysis of Space Equipment Information; Lecturer; E-mail: vgstarod@mail.ru
- Vladimir V. Tkachenko** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Technologies and Automation Tools for Processing and Analysis of Space Equipment Information; Senior Lecturer; E-mail: vka@mil.ru

Received 15.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023; accepted for publication 17.12.2023.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРЕДПРИЯТИЯ,
СВЯЗАННЫЕ С ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИЕЙ**

А. А. ЕМЕЛЬЯНОВ, И. Л. КОРШУНОВ*

*Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия***dept.ait@unecon.ru*

Аннотация. Цифровая трансформация предприятий является обязательным этапом перехода к цифровой экономике. Проанализировано понятие „цифровая трансформация“. Констатирован факт появления новых рисков в деятельности предприятий вследствие значительного увеличения их информационных связей. Предметом исследования являются технические риски предприятия в процессе его цифровой трансформации. Определены три группы рисков: несанкционированный доступ/хищение/искажение информации с использованием средств локального доступа; уязвимость сетевых каналов передачи информации; нечеткое распределение сфер ответственности. Проанализированы особенности каждой группы рисков и предложены мероприятия по снижению их уровня для предприятия.

Ключевые слова: цифровая трансформация предприятия, киберпространство, кибербезопасность, несанкционированный доступ к информации, уязвимость каналов связи

Ссылка для цитирования: Емельянов А. А., Коршунов И. Л. Технические риски предприятия, связанные с цифровой трансформацией // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 116—121. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-116-121.

ENTERPRISE TECHNICAL RISKS ASSOCIATED WITH DIGITAL TRANSFORMATION

A. A. Emelyanov, I. L. Korshunov*

*St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russia***dept.ait@unecon.ru*

Abstract. Digital transformation of enterprises is a mandatory stage of the transition to digital economy. The concept of “digital transformation” is analyzed. The fact of the emergence of new risks in the activities of enterprises due to a significant increase in their information connections are stated. The subject of the study is the technical risks of an enterprise in the process of its digital transformation. Three groups of risks are identified: unauthorized access/theft/distortion of information using local access means; vulnerability of network information transmission channels; unclear distribution of areas of responsibility. The features of each risk group are analyzed and measures to reduce their level for the enterprise are proposed.

Keywords: digital transformation of enterprise, cyberspace, cybersecurity, unauthorized access to information, vulnerability of communication channels

For citation: Emelyanov A. A., Korshunov I. L. Enterprise technical risks associated with digital transformation. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 116—121 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-116-121.

Тема цифровой трансформации экономики России остается актуальной. Прошел этап кампаний в цифровизации, появился опыт противодействия кибератакам (количество и качество которых резко возросли) на объекты критической информационной инфраструктуры.

Применительно к экономике России термин „цифровая трансформация“ впервые использован в Указе Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474 „О национальных целях развития РФ на период до 2030 года“ [1] для обозначения одной из национальных целей развития страны. На сегодняшний день не существует общепринятого определения этого термина, анализ научной литературы [2—4] позволяет выделить обязательные составляющие:

* © Емельянов А. А., Коршунов И. Л., 2024

- 1) кардинальное изменение бизнес-процессов или способов осуществления экономической деятельности;
- 2) изменения реализуются за счет применения информационных технологий (цифровых инструментов);
- 3) целью данного процесса является существенное повышение эффективности социально-экономической деятельности.

Суть цифровой трансформации предприятия можно представить следующим образом. Современные информационные технологии и их инструменты (Интернет, мобильные устройства, цифровые сервисы) позволяют существенно расширить возможности взаимодействия предприятия (предприятие—предприятие, предприятие—клиенты, предприятие—государство, клиент—государство и др.). Информационные технологии обеспечивают автоматизацию алгоритмов взаимодействия внутри и вне предприятия — эффективность взаимодействия существенно возрастает (снижается стоимость транзакций, увеличивается скорость информационных процессов, сокращается число ошибок и т.п.) — в результате качественно изменяется функционирование предприятия. Соединение возможностей информационных технологий и традиционных моделей деятельности предприятия приводит к появлению новых продуктов и бизнес-процессов с принципиально иными качествами.

Таким образом, можно констатировать, что одной из основных задач цифровой трансформации предприятия является алгоритмизация и автоматизация его взаимодействий, в настоящее время — с использованием аппаратно-программных комплексов (цифровых платформ). Будем рассматривать аппаратно-программный комплекс (АПК) как сложную информационную систему, обеспечивающую взаимосвязи участников рынка, открытую для использования предприятием, его партнерами и клиентами, включая разработчиков приложений, поставщиков услуг, агентов и регуляторов. Другими словами, АПК — это виртуальная среда, позволяющая интегрировать программные и аппаратные средства для обеспечения взаимодействия сторон. Виртуальная среда, или киберпространство, трактуется как пространство функционирования продуктов инфокоммуникационных технологий, позволяющих создавать чрезвычайно сложные системы взаимодействий агентов с целью получения информации, обмена и управления ею, а также осуществления коммуникаций в условиях множества различных сетей [5].

Существенное увеличение связей предприятия, особенно внешних, ведет к появлению новых экономических (новая модель бизнес-процессов) и технических рисков (использование киберпространства). Экономические риски, как правило, связаны с угрозой цифровому суверенитету предприятия и с изменением роли государства, а также с ростом сложности бизнес-моделей и схем взаимодействия. Отмечаемые специалистами социальные риски цифровой трансформации определяются человеческим фактором: утечки персональных данных; отсутствие достаточного количества специалистов, обладающих требуемыми компетенциями; значительное сокращение персонала из-за автоматизации деятельности и др.

Одним из важнейших требований эффективной и безопасной реализации различного рода бизнес-процессов на предприятиях является корректный анализ и сведение к минимуму технических рисков. Вследствие того что данная сфера затрагивает практически все области деятельности, становится очевидной необходимость инвестирования ресурсов (в частности, финансово-экономических) для корректного формирования модели потенциальных угроз безопасности с последующим принятием мер по их устранению [6].

Можно выделить несколько видов технического риска:

- 1) несанкционированный доступ к информации, ее хищение/искажение с использованием средств локального доступа. Подобные ситуации возникают, когда имеется возможность использования уязвимостей внутри защищаемого периметра (некорректно реализованные политики безопасности, разрешение сотрудникам выполнять действия, не входящие в их функциональные обязанности и т.д.);

2) уязвимость сетевых каналов передачи информации, что может приводить к перехвату/анализу/подмене межсетевого трафика на транзитных узлах;

3) неоднозначное распределение сфер ответственности, приводящее к тому, что ряд действий либо бездействие привели к утечке/повреждению данных. Например, использование организацией как локальных, так и облачных вычислительных ресурсов/хранилищ данных в гибридной модели ИТ-инфраструктуры зачастую размывает границы ответственности лиц за каждый из аспектов деятельности.

Для снижения вероятности возникновения рисков, связанных с информационной безопасностью, цифровая трансформация должна быть постепенной, поэтапной. Переход на использование любых технологий без тщательного анализа целесообразности часто приводит к значительным проблемам в функционировании предприятий. Например, внедрение технологий виртуализации с применением гипервизоров вместо изолированных серверных систем порождает потенциальные уязвимости, связанные с несанкционированным доступом одной операционной системы, работающей в рамках единого АПК, к процессам другой. В качестве примера можно привести АПК Meltdown, Spectre, TLBleed, связанные со специфическими особенностями исполнения микрокоманд в рамках различных центральных процессоров. Устранение ряда аппаратных уязвимостей (используемых методами несанкционированного доступа с общим названием side-channel) для снижения их влияния на всю систему в целом является весьма сложным и затратным процессом. Ситуация осложняется тем, что в программном и аппаратном обеспечении регулярно обнаруживаются новые, еще не учтенные уязвимости (называемые в технической литературе „уязвимости нулевого дня“), которые в ряде случаев позволяют без существенных усилий вредоносно воздействовать на ИТ-инфраструктуру. Для устранения таких уязвимостей требуется оперативная разработка обновлений безопасности и их внедрение. Зачастую при проектировании и поддержке работы серверной и сетевой подсистем предприятия данный аспект либо не учитывается, либо реализуется не в полной мере из-за существенных затрат времени и других ресурсов.

Также немаловажным фактором в рамках разработки локальной политики безопасности предприятия является корректное разграничение полномочий сотрудников. С одной стороны, жесткие меры, позволяющие в значительной степени снизить риски информационной безопасности, порой весьма эффективно защищают ИТ-активы предприятия; с другой — при этом могут возникать ситуации, когда для выполнения сотрудником функциональных обязанностей требуется привлечение специалистов отдела информационной безопасности, технической поддержки, получение разрешений от руководства и т.д. В этом случае временные и организационные затраты могут нивелировать преимущества жесткой модели разграничения прав и сфер ответственности. Данный аспект приобретает особенную значимость при организации работы в рамках ИТ-отделов предприятия. Наиболее рационален, с точки зрения авторов, сбалансированный вариант, при котором сотрудники без существенных сложностей выполняют свои рутинные задачи, имея возможность преодолевать технические проблемы, не затрачивая время профильных специалистов. В качестве меры контроля может применяться система мониторинга, включающая запись любых действий каждого сотрудника с последующим анализом в режиме реального времени. Если действие является потенциально недопустимым либо имеется высокая вероятность того, что оно может оказаться вредоносным, информация передается руководителю структурного подразделения и специалистам отдела информационной безопасности.

Как уже было отмечено, использование сетевых каналов передачи информации порождает опасность ее перехвата. Однако в процессе цифровой трансформации локализация ИТ-процессов предприятия без связи с внешним миром почти нереальна. Повсеместное использование ресурсов глобальной сети; децентрализация, приводящая к необходимости связи между собой различных филиалов; работа с глобальными цифровыми платформами и облачными ресурсами — все это требует надежной и безопасной среды передачи данных по раз-

личным каналам связи: эфирным (Wi-Fi), кабельным, оптоволоконным. Современная сетевая инфраструктура предприятия подразумевает наличие большого количества промежуточных узлов (шлюзов), через которые проходит трафик. Любой из таких АПК может стать точкой захвата/ анализа/хищения/подмены информации [7]. Кроме того, в рамках локального обмена данными внутри предприятия существует вероятность несанкционированных подключений к корпоративной сети. Подобные уязвимости можно нивелировать средствами криптозащиты передаваемого трафика. Для связи между разнесенными территориально филиалами предприятий обычно используется сеть Интернет. Использование виртуальных частных сетей позволяет, с одной стороны, избежать расходов по созданию индивидуальных каналов связи; с другой — обеспечить надежное шифрование/дешифровку передаваемой по общедоступной сети информации. Кроме того, по мнению авторов, для защиты трафика во внутренней (локальной) сети целесообразно использование сетевых протоколов на базе IPSec, которые позволяют устанавливать соединение между любыми двумя устройствами исключительно по защищенному каналу передачи данных. В этом случае любые несанкционированные подключения к сетевой инфраструктуре предприятия будут бессмысленны, так как нелегитимно используемое устройство не сможет взаимодействовать ни с одним из АПК, работающих внутри организации. При этом как для конечных пользователей, так и для разработчиков, процесс сетевого взаимодействия будет проходить штатно, т.е. меры по защите трафика будут осуществляться автоматически.

Использование облачных ресурсов (с моделями IaaS, PaaS, SaaS, DBaaS и других), равно как и АПК (зачастую работающих с применением описанных моделей), порождает дополнительные уязвимости, связанные с хранением и обработкой данных в рамках центров обработки данных (ЦОД) организаций, являющихся сторонними по отношению к адресатам услуг. Любой современный центр обработки данных, рассчитанный на работу с большим количеством внешних клиентов, представляет собой распределенную кластерную инфраструктуру, в которой имеются уязвимости, как присущие локальным системам (рассмотренные выше), так и дополненные спецификой, свойственной кластерным решениям [6, 7]. Гибридные и распределенные гипервизоры (такие, как Hyper-V, vSphere, Proxmox и др.), с помощью которых реализуется работа большого количества изолированных сервисов, представляют собой программные решения, в которых регулярно обнаруживаются новые уязвимости [8]. При этом организации, арендующие вычислительные ресурсы в рамках той или иной облачной модели обслуживания, не могут влиять на инфраструктуру провайдера и даже получать информацию о средствах/уровне защиты конфиденциальных ресурсов. Вследствие этого меры, которые могут быть приняты для снижения вероятности несанкционированного доступа/хищения информации, следует реализовывать исходя из предположения, что ЦОД облачного провайдера является ненадежным и имеется риск компрометации хранящихся и обрабатываемых там данных. Рациональным будет лишь использование вычислительных мощностей, но не хранение данных, которые значимы для организации. При необходимости использования систем хранения данных облачных провайдеров следует применять криптографическую защиту — например, шифрующие файловые системы в рамках модели IaaS.

Технические риски, связанные с цифровой трансформацией предприятия, не ограничиваются рассмотренными в статье. Можно констатировать, что в современных условиях недостаточно обеспечивать защиту информации предприятия лишь в пределах его внутреннего контура. Каждый из рассмотренных аспектов безопасности значим для работы организации. Цифровая трансформация, осуществляемая без учета всего спектра потенциальных сложностей, которые будут возникать в процессе перехода, может быть провальной и нести лишь убытки. Проблемы, которые всегда будут возникать при внедрении новых технологий, порождают и новые технические риски, которые зачастую связаны с социальными рисками, например, использование технологий роботизации бизнес-процессов приводит к массовым увольнениям сотрудников, что повышает уровень напряженности [9]. Недостаточное владе-

ние основным спектром современных технологий порождает низкий уровень технической грамотности кадрового состава и затруднения при переходе к использованию более современных решений [10]. Любое изменение (особенно связанное с внедрением технологий, кардинально меняющих многие аспекты работы предприятия) должно быть тщательно проанализировано, смоделировано и только после этого поэтапный, плавный переход может иметь шансы на успех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474 „О национальных целях развития РФ на период до 2030 года“ [Электронный ресурс]: <<https://bazanpa.ru/prezident-rf-ukaz-n474-ot21072020-h4825501/>> (01.08.2023).
2. Лопатова Н. Г. Риски цифрового преобразования предприятия // Экономическая наука сегодня. Сб. науч. статей. Вып. 13. Минск: БНТУ, 2021. С. 112—118.
3. Стратегия цифровой трансформации: написать, чтобы выполнить / Под ред. Е. Г. Потановой, П. М. Потеева, М. С. Шклярж. М.: РАНХиГС, 2021. 184 с.
4. Абдрахманова Г. И., Васильковский С. А., Вишневецкий К. О., Гершман М. А., Гохберг Л. М. Цифровая трансформация: ожидания и реальность // Сб. докл. XXIII Ясинской (Апрельской) междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 221 с.
5. Добринская Д. Е. Киберпространство: территория современной жизни. // Вестн. Московского ун-та. Сер. 18. Социология и политология. 2018. Т. 24, № 1. С. 52—70.
6. Богатырев В. А. Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 18—21.
7. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. Model and interaction efficiency of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF 2019). 2019. P. 8840647.
8. Демидов А. В., Емельянов А. А. Анализ уязвимостей и разработка требований к безопасности в современной IT-инфраструктуре // Цифровые опасности информационного общества. СПб: СПбГЭУ, 2023. С. 42—48.
9. Емельянов А. А., Кориунов И. Л., Микадзе С. Ю. К вопросу о цифровом суверенитете России // Изв. СПбГЭУ. 2022. № 6. С. 84—90.
10. Колбанёв М. О., Кориунов И. Л., Микадзе С. Ю., Тумарев В. М. К вопросу о терминологии в области цифровой экономики // Экосистема цифровой экономики. СПб: СПбГЭУ, 2021. С. 4—12.

Сведения об авторах

- Александр Александрович Емельянов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный экономический университет, кафедра информационных систем и технологий; доцент; E-mail: sl_alex2000@mail.ru
- Игорь Львович Кориунов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный экономический университет, кафедра информационных систем и технологий; заведующий кафедрой; E-mail: dept.ait@unecon.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 01.10.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. <https://bazanpa.ru/prezident-rf-ukaz-n474-ot21072020-h4825501/>. (in Russ.)
2. Lopatova N.G. *Economic Science Today. Collection of Scientific Articles. Issue 13*, Minsk, Belarus, 2021, pp. 112—118. (in Russ.)
3. Potapova E.G., Poteev P.M., Shklyaruk M.S., eds., *Strategiya tsifrovoy transformatsii: napisat', chtoby vypolnit'* (Digital Transformation Strategy: Write to Execute), Moscow, 2021, 184 p. (in Russ.)
4. Abdrakhmanova G.I., Vasilkovsky S.A., Vishnevsky K.O., Gershman M.A., Gokhberg L.M. *Tsifrovaya transformatsiya: ozhidaniya i real'nost'* (Digital Transformation: Expectations and Reality), Reports of the XXIII Yasinsk (April) Intern. Scientific Conf. on Problems of Economic and Social Development, Moscow, 2022, 221 p. (in Russ.)
5. Dobrinskaya D.E. *Moscow State University Bulletin. Series 18. Sociology and Political Science*, 2018, no. 1(24), pp. 52—70. (in Russ.)

6. Bogatyrev V.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 10, pp. 18–21. (in Russ.)
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019)*, 2019, pp. 8840647.
8. Demidov A.V., Emelyanov A.A. *Tsifrovyye opasnosti informatsionnogo obshchestva* (Digital Dangers of the Information Society), St. Petersburg, 2023, pp. 42–48. (in Russ.)
9. Emelyanov A.A., Korshunov I.L., Mikadze S.Y. *Izvestiâ Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo èkonomičeskogo universiteta*, 2022, no. 6, pp. 84–90. (in Russ.)
10. Kolbanov M.O., Korshunov I.L., Mikadze S.Yu., Tumarev V.M. *Ekosistema tsifrovoy ekonomiki* (Ecosystem of the Digital Economy), St. Petersburg, 2021, pp. 4–12. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|-------------------------------|--|
| Alexander A. Emelyanov | — PhD; St. Petersburg State University of Economics, Department of Information Systems and Technologies; Associate Professor; E-mail: s1_alex2000@mail.ru |
| Igor L. Korshunov | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Economics, Department of Information Systems and Technologies; Head of the Department; E-mail: dept.ait@unecon.ru |

Received 11.09.2023; approved after reviewing 01.10.2023; accepted for publication 17.12.2023.

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ТРУДНОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

В. А. ЗЕЛЕНЦОВ

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
v.a.zelentsov@gmail.com*

Аннотация. Разработан метод формирования интегральной оценки качества трудноформализуемых объектов на примере анализа устойчивости лесных экосистем. Предлагаемый метод основан на процедурах многокритериального анализа и квалиметрии моделей и полимодельных комплексов. Используется двухуровневая классификация показателей устойчивости, включающая совокупность частных и обобщенных показателей. Интегральная оценка устойчивости формируется на базе значений обобщенных показателей. Рассматривается наиболее общий случай, когда рассматриваемые показатели имеют сложную структуру, измеряются в различных шкалах (количественных и качественных) и могут быть нелинейно связаны друг с другом. Описание метода проводится на примере получения интегральной оценки устойчивости при использовании трех обобщенных показателей, описывающих продуктивную способность, санитарное состояние, биоразнообразие лесов. Каждый из обобщенных показателей представляет собой лингвистическую переменную. Суть метода состоит в применении продукционных моделей предпочтения лица, принимающего решения, и обработки данных экспертного опроса методами теории нечетких мер. Использование метода позволяет описать и учесть нелинейное влияние совокупности обобщенных показателей на результирующую оценку устойчивости и за счет этого получить наиболее достоверные результаты. На основе предложенного метода можно получить оценки интегральной устойчивости, провести сравнительный анализ участков леса с различными значениями частных показателей, а также устойчивости одного и того же участка в разные моменты времени.

Ключевые слова: трудноформализуемые объекты, многокритериальный анализ, интегральная оценка, устойчивость, лесные экосистемы, лингвистическая шкала, продукционные модели, экспертный опрос

Благодарности: исследования по разделу „Метод решения“ выполнены в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004; исследования по разделу „Многокритериальный анализ устойчивости лесной экосистемы“ выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>).

Ссылка для цитирования: Зеленцов В. А. Метод формирования интегральной оценки качества трудноформализуемых объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 122—132. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-122-132.

METHOD FOR CREATING AN INTEGRAL ASSESSMENT OF THE QUALITY
OF DIFFICULT-TO-FORMALIZE OBJECT

V. A. Zelentsov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia
v.a.zelentsov@gmail.com*

Abstract. A method for creating an integral assessment of the quality of difficult-to-formalize object is developed using the example of analysis of forest ecosystem sustainability. The proposed method is based on the procedures of multicriteria analysis and qualimetry of models and multi-model complexes. A two-level classification of sustainability indicators is used, including a set of specific and general indicators. An integral assessment of sustainability is created on the

basis of the values of generalized indicators. The most general case is analyzed when the indicators under consideration have a complex structure, are measured in various scales (quantitative and qualitative) and can be related non-linearly to each other. The method description is carried out using the example of deriving an integral assessment of sustainability on the basis of three generalized indicators characterizing the productive capacity, sanitary condition, and biodiversity of forests. Each of the generalized indicators represents a linguistic variable. The essence of the method is the application of production models of preference of the decision maker and processing of expert survey data by the methods of the theory of fuzzy measures. Using the method allows to describe and take into account the nonlinear influence of a set of generalized indicators on the resulting assessment of stability and thereby obtain the most reliable results. Based on the proposed method, it is possible to obtain estimates of the forest integral sustainability, to conduct a comparative analysis of forest vegetation sites with different values of generalized indicators, as well as for the same site at different points in time.

Keywords: difficult-to-formalize object, multicriteria analysis, integral assessment, sustainability, forest ecosystem, linguistic scales, production models, expert survey

Acknowledgments: Research in the section “Solution method” was carried out within the framework of the budget topic FFZF-2022-0004; Research in the section “Multi-criteria analysis of the sustainability of a forest ecosystem” was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>).

For citation: Zelentsov V. A. Method for creating an integral assessment of the quality of difficult-to-formalize object. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 122—132 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-122-132.

Введение. Одно из актуальных направлений развития методов системного анализа — разработка способов моделирования процессов функционирования и оценивания качества сложных трудноформализуемых объектов и систем, к которым относятся многие социотехнические, экономические, а также природные объекты и системы. В частности, характерным примером трудноформализуемой задачи является получение интегральной оценки устойчивости лесных экосистем (в настоящей статье термин „лесная экосистема“ используется в узком смысле, в значении „совокупность лесной растительности на заданном участке территории“). Этой задаче присущи такие признаки, как наличие многих показателей, нелинейно связанных друг с другом, применение различных шкал для разных показателей (как количественных, так и качественных), иерархическая структура показателей. Метод решения данной задачи может иметь достаточно общий характер, он применим и для других типов трудноформализуемых объектов.

Необходимо отметить, что задача оценки устойчивости лесных экосистем находится в центре внимания российских и зарубежных исследователей в области лесопользования, экологии, прикладных информационных технологий и обработки данных в течение последних нескольких десятилетий. Результаты оценивания устойчивости служат основой для принятия решений по управлению лесопользованием, планированию развития территорий, экологической безопасности, и имеют глобальное значение для анализа природной среды в целом в связи с высокой важностью функций, выполняемых лесами и усилением антропогенного давления на лесные экосистемы.

В настоящее время активно проводятся исследования, посвященные различным аспектам анализа показателей устойчивости лесных экосистем и созданию моделей для их оценивания. Подходы к оцениванию устойчивости базируются на общих положениях теории устойчивости геосистем и описанных механизмах устойчивости различных природных компонентов [1—3]. При этом в современной литературе приводится достаточно большое количество определений понятия устойчивости. Применительно к лесным экосистемам чаще всего под устойчивостью понимается их способность сохранять (в определенных пределах) структуру и характер функционирования в пространстве и во времени при изменяющихся условиях среды, в том числе под влиянием антропогенных факторов [4—7]. Именно в таком контексте будет использоваться понятие „устойчивость“ в настоящей работе.

При всем терминологическом многообразии, связанном с понятием устойчивости, в материалах российских и зарубежных исследователей подчеркивается тот факт, что для оценивания устойчивости лесных экосистем необходимо использовать множество частных показателей (как количественных, так и качественных) и соответственно — разнотипных моделей функционирования лесных насаждений [7—12]. Используются такие частные показатели, как скорость роста, продуктивность и плотность древостоя, видовое разнообразие, повреждения растительности и др. [7, 13, 14]. Для расчета показателей устойчивости используются различные модели функционирования лесной растительности, каждая из которых может применяться для оценивания своего показателя устойчивости или их совокупности [8—11, 15].

При формировании общего взгляда на устойчивость лесной экосистемы и проведении сравнительного анализа отдельные частные показатели обычно группируются для последующего оценивания обобщенных показателей устойчивости по каждому анализируемому направлению. Далее по результатам оценивания обобщенных показателей может быть сформирована интегральная (результатирующая) оценка устойчивости лесной экосистемы.

Наиболее общий состав направлений оценивания и соответствующих им обобщенных показателей устойчивости, применяемых в международной практике, включает в себя продуктивную способность лесов; влияние антропогенных факторов и жизнеспособность лесов; питательный и водный режим почв и древесных растений; защитную функцию лесов; сохранение и поддержание биологического разнообразия лесов, углеродный цикл; социально-экономическую функцию лесов [16]. В Российской Федерации в настоящее время руководствуются нормативным документом, представляющим критерии и индикаторы устойчивого управления лесами [17]. Документ также предполагает использование комплекса показателей для оценивания устойчивости лесной экосистемы. Состав применяемых обобщенных и частных показателей в России в целом скоординирован с международным подходом.

Отметим, что используемые здесь термины „обобщенный показатель“ и „частный показатель“ соответствуют по смыслу применяемым в зарубежных, а иногда и отечественных, публикациях терминам „критерий“ и „индикатор“, но более — устоявшейся отечественной терминологии в области многокритериального анализа и принятия решений [18].

Необходимо также отметить, что вопросы устойчивости лесных экосистем, как правило, рассматриваются в контексте задач управления, а именно — устойчивого управления. Поскольку многокритериальная оценка устойчивости (задача анализа) является составной частью задачи управления (задачи синтеза) и ее первым этапом, представляется правомерным использование подходов к определению состава частных и обобщенных показателей, принятых при исследовании задач управления лесными экосистемами, для формирования оценок устойчивости по частным, обобщенным и интегральным показателям.

Существующая иерархия [16, 17] показателей обуславливает целесообразность двухуровневого подхода к получению интегральной оценки устойчивости лесной экосистемы, при котором на первом (нижнем) уровне на основе анализа значений групп частных показателей формируются оценки по соответствующим обобщенным показателям, на втором (верхнем уровне) может быть выведена интегральная оценка на базе оценок по всем обобщенным показателям или их части — в зависимости от целей исследования.

В настоящей статье исследуется способ решения задачи верхнего уровня, т.е. получение интегральной оценки устойчивости лесной экосистемы на базе оценивания по общепринятым и перечисленным выше обобщенным показателям. Причем рассматривается наиболее общий случай, когда показатели устойчивости имеют сложную структуру, измеряются в различных шкалах (количественных и качественных) и могут быть нелинейно связаны друг с другом.

К настоящему времени устоявшихся подходов к получению интегральной оценки устойчивости лесной экосистемы на базе единого комплексного показателя не существует. Вместе с тем в ряде работ (например, [4, 10]) показано, что функционирование и развитие лесных экосистем базируется на общих системно-кибернетических закономерностях. Это от-

крывает возможности для применения методов, разработанных в системно-кибернетической области знаний, для задач анализа лесных экосистем. Такие возможности продемонстрированы целым рядом исследователей (см. например, [4, 10]). В частности, для разрешения неопределенности, связанной с многокритериальностью в задачах оценивания устойчивости лесных экосистем, представляется перспективным развивать и адаптировать результаты, полученные в таких современных направлениях системно-кибернетической отрасли, как теория управления структурной динамикой сложных систем [19] и квалиметрия моделей и полимодельных комплексов [18].

Многокритериальный анализ устойчивости лесной экосистемы. Характеризуя проблему многокритериального анализа устойчивости лесной экосистемы, следует отметить, что в настоящее время существует большое разнообразие подходов к решению подобных задач для сложных систем различного класса. К ним можно отнести подходы к преодолению критериальной неопределенности, основанные на количественных измерениях [20—22]; методы, основанные на первичных качественных измерениях, результаты которых сразу переводятся в количественный вид [23, 24]; методы, основанные на количественных измерениях, но использующие несколько индикаторов при сравнении альтернатив [25, 26]; методы вербального анализа, основанные на качественных измерениях без какого-либо перехода к количественным переменным [27].

Часто для решения задач многокритериального анализа и выбора выполняют скаляризацию обобщенного векторного показателя путем формирования сверток различного вида [20, 28]. Использование сверток обусловлены и основные недостатки данных методов в случае их применения для оценивания устойчивости лесной экосистемы, а именно:

— определение используемых в свертках весовых коэффициентов отдельных показателей сопряжено с серьезными трудностями получения и обработки экспертной информации, в результате весовые коэффициенты слабо связаны с действительной ролью отдельных показателей при оценке интегрального показателя;

— не учитывается нелинейный характер влияния показателей друг на друга и на интегральный показатель устойчивости лесной экосистемы.

При многокритериальном оценивании устойчивости лесной экосистемы используемые показатели могут оцениваться как количественно, так и качественно, в том числе лингвистически (вербально), что характеризует рассматриваемую задачу как неструктурированную или слабоструктурированную. Можно выделить два пути решения таких задач:

1) описание качественных показателей особым образом построенными количественными показателями (балльные оценки, нечеткие числа, лингвистические переменные). При этом считается, что использование ряда математических технологий, таких как теория нечетких множеств, отношений и мер, нечеткого интегрирования, позволяет эффективно формализовать и решать слабоструктурированные задачи;

2) применение методов вербального (порядкового) анализа решений [27], в основе которых лежит построение единой шкалы изменения качества на множестве значений всех показателей и применение так называемых опорных ситуаций (утопического, или идеального, решения, а также противоположного ему решения).

В условиях большого количества частных показателей устойчивости лесных экосистем, их нелинейной взаимосвязи возникает необходимость в разработке нового комбинированного метода многокритериального анализа, суть которого состоит в применении множества опорных ситуаций в виде продукционных моделей предпочтения лица, принимающего решения, обработки данных экспертного опроса методами теории нечетких мер [29—32].

Метод решения. Обозначим через $F_1, F_2, \dots, F_m$ обобщенные показатели устойчивости лесных экосистем. В качестве таких показателей, как уже указывалось, могут рассматриваться: продуктивная способность лесов, санитарное состояние и жизнеспособность лесов; био-

разнообразие и углеродный цикл, защитные, а также социально-экономические функции лесов [17]. В конкретных задачах может использоваться какая-либо выборка из полного перечня показателей. Без потери общности проводимого исследования и во избежание излишней громоздкости записей при описании метода решения будем рассматривать три обобщенных показателя, например, такие, как продуктивная способность (F_1), санитарное состояние (F_2); биоразнообразие (F_3). В конкретных прикладных задачах состав анализируемых показателей может отличаться от этого перечня.

Результирующий (интегральный) показатель устойчивости лесной экосистемы $F_{\text{res}} = f(F_1, F_2, \dots, F_m)$ при отсутствии, в общем случае, аналитического выражения для этой функции можно представить полиномом

$$F_{\text{res}} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^m \lambda_{ij} F_i F_j + \dots + \lambda_{12\dots m} F_1, F_2, \dots, F_m \quad (1)$$

с коэффициентами, отражающими влияние как отдельно взятых показателей F_i (через значения коэффициентов λ_i), так и влияние совокупностей по два (λ_{ij}), три (λ_{ijk}) и т.д. показателей.

Использование обобщенной формулы (1) позволяет описать и учесть отмеченное выше нелинейное влияние совокупности обобщенных показателей на результирующую оценку устойчивости лесной экосистемы.

Для нахождения зависимости $F_{\text{res}} = f(F_1, F_2, \dots, F_m)$ необходимо задать сочетания переменных $F_1, F_2, \dots, F_m$ и определить для каждого из них значения функции F_{res} с тем, чтобы найти значения коэффициентов выражения (1). Данная задача может быть решена следующим образом.

Каждый из обобщенных показателей F_i при оценивании устойчивости представляет собой (в самом общем случае) лингвистическую переменную, принимающую значение из множества простых и составных термов

$$T(F_i) = \{\text{"низкий", "ниже среднего", "средний", "выше среднего", "высокий"}\} = \{Н, НС, С, ВС, В\}.$$

Для формального представления термов лингвистических переменных можно использовать нечеткие числа L—R-типа [17, 24]. Тогда значения каждого частного показателя можно представить некоторой 100-балльной шкалой (рис. 1).

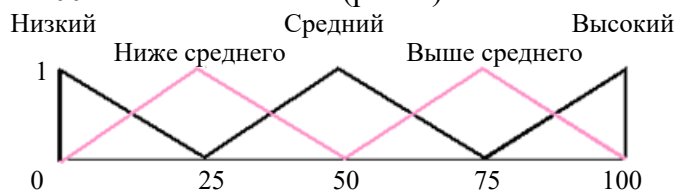


Рис. 1

Необходимо отметить, что условием применения модели (1) является оценивание показателей качества в симметричной относительно среднего значения шкале. Шкала для показателей будет соответствовать этому требованию, если ее значения перевести в биполярную шкалу $[-1, 0, +1]$, в которой среднее значение соответствует нулевому уровню показателя. С этой целью возможные крайние значения лингвистической переменной F_i маркируют как -1 и $+1$, при этом точка „0“ соответствует середине шкалы (в соответствии с физическим смыслом данного показателя). Кодирование текущего значения лингвистической переменной F_i осуществляется по формулам $\hat{F}_i = (F_i - F_{\text{cp}}) / h$, где F_i — значение показателя на шкале лингвистической переменной; $F_{\text{cp}} = (F_{i\text{max}} + F_{i\text{min}}) / 2$ — средняя точка шкалы переменной; $h = (F_{i\text{max}} - F_{i\text{min}}) / 2$ — интервал варьирования; $F_{i\text{max}}, F_{i\text{min}}$ — крайние значения переменной. Результат перевода в новую шкалу представлен на рис. 2.

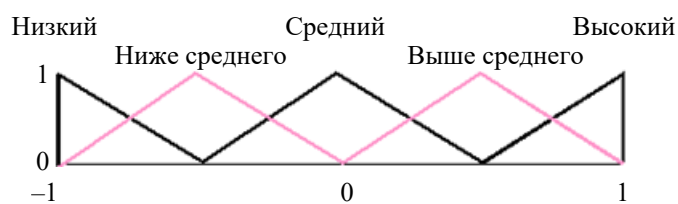


Рис. 2

Обобщенная оценка устойчивости лесной экосистемы формируется на основе анализа одновременно нескольких показателей с соответствующими значениями термов.

В самом общем виде сведения о взаимосвязи частных показателей с результирующим показателем устойчивости F_{res} можно представить продукционными моделями вида: P_j : „IF $F_1 = A_{1j}$ and $F_2 = A_{2j}$ and...and $F_m = A_{mj}$, THEN $F_{\text{res}} = A_{j\text{res}}$ “, где $A_{ij} \in T(F_i)$, $A_{j\text{res}} \in T(F_{\text{res}})$ являются термами соответствующих лингвистических переменных.

Принятым качественным оценкам соответствует шкала для результирующего показателя, приведенная на рис. 3, с учетом того, что термы $A_{ij}, A_{j\text{res}}$ можно задать с помощью нечетких чисел L—R-типа.

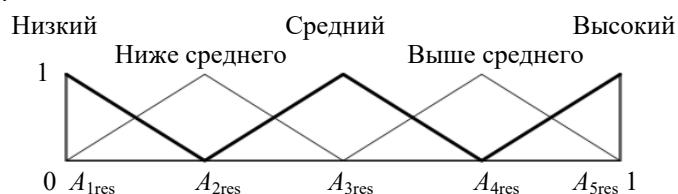


Рис. 3

Расчет значений λ осуществляется по результатам формирования указанных выше продукционных моделей по правилам, принятым в теории планирования эксперимента. Как правило, при сложном взаимодействии частных показателей достоверно сформировать продукционные модели можно только с использованием мнений квалифицированных экспертов в рассматриваемой предметной области.

Для этого вначале строится матрица опроса на профессиональном языке эксперта в крайних значениях показателей $F_i, i = 1(1)m$ (m — число показателей). В случае $m = 3$ матрица опроса имеет вид табл. 1 (П — плохой, НС — ниже среднего, С — средний, ВС — выше среднего, Х — хороший).

Таблица 1

Номер высказывания	F_1	F_2	F_3	F_{res}
1	Низкий	Низкий	Низкий	П
2	Высокий	Низкий	Низкий	НС
3	Низкий	Высокий	Низкий	П
4	Высокий	Высокий	Низкий	С
5	Низкий	Низкий	Высокий	НС
6	Высокий	Низкий	Высокий	ВС
7	Низкий	Высокий	Высокий	С
8	Высокий	Высокий	Высокий	Х

Так, например, во второй строке таблицы представлено следующее суждение эксперта: «Если показатель F_1 имеет значение „высокий“, F_2 — „низкий“, F_3 — „низкий“, то результирующий показатель F_{res} оценивается как „ниже среднего“».

Затем формируется ортогональный план экспертного опроса [33, 34], который для случая $m = 3$ имеет вид табл. 2. Для формирования таблицы использовано кодирование значения „высокий“ в „1“, а значения „низкий“ — в „-1“.

Таблица 2

Номер	F_0	F_1	F_2	F_3	F_1F_2	F_1F_3	F_2F_3	$F_1F_2F_3$	F_{res}
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	П
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	НС
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	П
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	С
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	НС
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	ВС
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	С
8	1	1	1	1	1	1	1	1	Х

Считаем, что каждый показатель может принимать значения из интервала $[0, 1]$, при этом значения термов лингвистической переменной F_{res} могут быть представлены нечеткими треугольными числами, как показано на рис. 4.

Для формирования интегрального показателя с вещественными коэффициентами проведем операцию дефаззификации значений лингвистической переменной F_{res} , для чего каждому терму поставим в соответствие моду его нечеткого числа (П — 0,2; НС — 0,45; С — 0,55; ВС — 0,75; Х — 1).

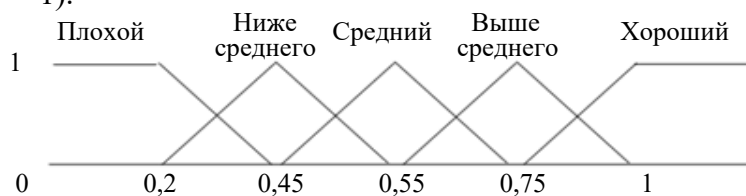


Рис. 4

Расчет коэффициентов полинома (1) производится по правилам, принятым в теории планирования эксперимента [29, 31], для чего вычисляются усредненные скалярные произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор дефаззифицируемых значений результирующего показателя. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

F_0F_{res}	F_1F_{res}	F_2F_{res}	F_3F_{res}	$F_1F_2F_{\text{res}}$	$F_1F_3F_{\text{res}}$	$F_2F_3F_{\text{res}}$	$F_1F_2F_3F_{\text{res}}$	Значение полинома
0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2	0,2	-0,2	0,20
0,45	0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	0,45	0,45	0,45
0,2	-0,2	0,2	-0,2	-0,2	0,2	-0,2	0,2	0,20
0,55	0,55	0,55	-0,55	0,55	-0,55	-0,55	-0,55	0,55
0,4	-0,4	-0,4	0,4	0,4	-0,4	-0,4	0,4	0,40
0,75	0,75	-0,75	0,75	-0,75	0,75	-0,75	-0,75	0,75
0,55	-0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	0,55	-0,55	0,55
1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
$\lambda_0 = 0,5125$	$\lambda_1 = 0,175$	$\lambda_2 = 0,0625$	$\lambda_3 = 0,1625$	$\lambda_{12} = 0,025$	$\lambda_{13} = 0,025$	$\lambda_{23} = 0,0375$	$\lambda_{123} = 0$	

Таким образом, полином для расчета устойчивости в нашем случае имеет следующий вид:

$$F_{\text{res}} = 0,5125 + 0,175F_1 + 0,0625F_2 + 0,1625F_3 + 0,025F_1F_2 + 0,025F_1F_3 + 0,0375F_2F_3. \quad (2)$$

Если не проводить дефаззификацию значений результирующего показателя, приведенная методика позволяет построить функциональную зависимость интегрального показателя устойчивости от F_i с нечеткими коэффициентами $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12 \dots m}$.

Таким образом, процедура получения интегральной оценки устойчивости лесных насаждений по совокупности значений обобщенных показателей включает следующие шаги.

Шаг 1. Формирование множества лингвистических шкал для каждого из частных показателей и результирующего показателя устойчивости. Перевод частных показателей в шкалу $[-1, +1]$.

Шаг 2. Проведение экспертного опроса (формирование продукционных правил) и построение ортогонального плана опроса экспертов.

Шаг 3. Определение коэффициентов полинома для определения интегрального (результирующего) показателя устойчивости.

Среди перечисленных шагов наиболее важным и ответственным является шаг 2, связанный с получением ответов экспертов на вопросы, содержащиеся в продукционных правилах. При пяти (и более) частных показателях качества существенно возрастает число задаваемых вопросов и у экспертов возникают объективные трудности в оценивании предлагаемых комбинаций значений показателей. В этом случае выполняются специальные приемы оценивания только простых опорных ситуаций с последующим оцениванием результирующего показателя путем построения конструктивной параметрической λ -нечеткой меры Сугено [23, 32] на конечном множестве простых опорных ситуаций.

Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим следующий пример.

Анализируются три участка лесных насаждений, для которых определены значения обобщенных показателей устойчивости (табл. 4), а результаты экспертного опроса по оцениванию совместного влияния обобщенных показателей на устойчивость соответствуют табл. 1; также в табл. 4 приведены результаты перевода указанных в оценках в шкалу $[-1, 1]$.

Таблица 4

Показатель	Участок 1		Участок 2		Участок 3	
	до перевода	после перевода	до перевода	после перевода	до перевода	после перевода
F_1	0,7	0,4	0,5	0	0,8	0,6
F_2	0,3	-0,4	0,9	0,8	0,7	0,4
F_3	0,8	0,6	0,7	0,4	0,4	-0,2

Результирующий показатель устойчивости лесных экосистем, вычисленный по соотношению (2) в соответствии с описанным выше порядком расчета, принимает значения: для первого участка $F_{\text{res}} = 0,69$; для второго — 0,56; для третьего — 0,61.

Интересно отметить, что при применении обычной аддитивной свертки обобщенных показателей в случае равных весов показатели устойчивости лесов на 1-м и 2-м участках получались бы одинаковыми. Однако более тонкий учет взаимного влияния показателей при использовании предложенного порядка расчетов позволяет получить и более адекватную результирующую оценку. Тем самым обеспечивается более обоснованный выбор и точный анализ эффективности мер по устойчивому управлению лесными экосистемами.

Закключение. На основе предложенного метода можно оценить значение интегрального показателя устойчивости лесных насаждений, а также провести сравнительный анализ интегральной устойчивости для участков лесной растительности с различными значениями частных показателей, а также для одного и того же участка в разные моменты времени. Реализуется наиболее общий подход к расчетам, учитывающий иерархическую структуру показателей устойчивости: частные показатели—обобщенные показатели—интегральный показатель. При этом обобщенные показатели, на базе которых вычисляется интегральная оценка, представляются в наиболее общем виде: в виде лингвистической шкалы.

Описанный метод формирования интегральной оценки позволяет учесть нелинейные взаимосвязи обобщенных показателей устойчивости лесных насаждений между собой и за счет этого получить наиболее достоверные результаты. Это обеспечивает возможности повышения объективности оценивания мероприятий по управлению лесными экосистемами

и определяет общность предложенного метода и возможность его использования при оценивании качества трудноформализуемых объектов широкого класса. Необходимым условием для такого оценивания является наличие моделей расчета прогнозных значений отдельных показателей при принятии тех или других управленческих решений либо возможность экспертного оценивания данных показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазовский Н. Ф., Арманд А. Д. Механизмы устойчивости геосистем. М.: Наука, 1992. 202 с.
2. Куприянова Т. П. Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М.: Институт географии АН СССР, 1989. 333 с.
3. Lara M., Doyen L. Sustainable Management of Natural Resources. Mathematical models and methods. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008. 266 p.
4. Одум Ю. Экология: В 2 т. Т. 1. М.: Мир, 1986. 328 с.
5. Алексеев А. С. и др. Устойчивое управление лесным хозяйством: научные основы и концепции. СПб: ГЛТА, 1998. 222 с.
6. Керженцев А. С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006. 259 с.
7. Коломыц Э. Г., Шарая Л. С. Устойчивость лесных экосистем, методы ее исчисления и картографирования // Наземные экосистемы. 2014. С. 93–107.
8. Полуэктов Р. А., Пых Ю. А., Швытов И. А. Динамические модели экологических систем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
9. Семевский Ф. Н., Семенов С. М. Математическое моделирование экологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 280 с.
10. Хомяков П. М., Иванов В. Д., Искандарян Р. А. и др. Геоэкологическое моделирование для целей управления природопользованием в условиях изменений природной среды и климата. М.: URSS, 2002. 400 с.
11. Frelich L. E. Forest Dynamics and Disturbance Regimes. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 266 p.
12. Стороженко В. Г. Теория устойчивости в практике лесопатологических обследований рекреационных лесов (на примере древостоев Серебряноборского опытного лесничества ИЛАН РАН) // Лесохозяйственная информация. 2019. № 4. С. 87–97.
13. Свирежев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 293 с.
14. Коломыц Э. Г., Керженцев А. С., Шарая Л. С. Аналитические и картографические модели функциональной устойчивости лесных экосистем // Успехи соврем. биологии. 2015. Т. 135, № 1. С. 127–149.
15. Кузнецов В. И., Козлов Н. И., Хомяков П. М. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления лесным хозяйством. М.: URSS, 2005. 232 с.
16. Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests. The Montréal Process. Fourth Edition, October 2009 [Электронный ресурс]: <https://montreal-process.org/documents/publications/general/2009/2009p_4.pdf>. (дата обращения: 06.10.2023).
17. Приказ Рослесхоз от 05.02.98 N 21 "Об утверждении критериев и индикаторов устойчивого управления лесами Российской Федерации".
18. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
19. Sokolov B., Zelentsov V. A., Nemykin S. Conceptual and Formal Modelling of Monitoring Systems Structure-Dynamics Control // Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems. 2016. Vol. 466. P. 391–401.
20. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
21. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 176 с.

22. Podinovski V. V. Decision making under uncertainty with unknown utility function and rankordered probabilities // European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 239, N 2. P. 537—541.
23. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука. 1986. 312 с.
24. Павлов А. Н., Соколов Б. В. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие. СПб: ГУАП, 2006. 72 с.
25. Руа Б. Проблемы и методы принятия решений в задачах с многими целевыми функциями // Вопросы анализа и процедуры принятия решения. М.: Мир, 1976. С. 21—58.
26. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
27. Ларичев О. И. Вербальный анализ решений. М.: Наука, 2006. 181 с.
28. Михалевич В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 286 с.
29. Pavlov A., Sokolov B., Pashchenko A., Shalyto A., Maklakov G. Models and methods for multicriteria situational flexible reassignment of control functions in man-machine systems // Proc. of the 2016 IEEE 8th Intern. Conf. on Intelligent Systems. 2016. P. 402—408.
30. Pavlov A. N., Pavlov D. A., Pavlov A. A., Slin'ko A. A. The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems // Proc. of the 6th Computer Science On-line Conf. 2017 (CSOC2017). 2017. Vol. 2: Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. P. 131—140.
31. Зеленцов В. А., Павлов А. Н. Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6. С. 7—12.
32. Пытьев Ю. П. Возможность как альтернатива вероятности. Математические и эмпирические основы, применение. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 464 с.
33. Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. Методы планирования эксперимента и обработки данных: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 131 с.
34. Спесивцев А. В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 238 с.

Сведения об авторе

Вячеслав Алексеевич Зеленцов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com

Поступила в редакцию 26.10.2023; одобрена после рецензирования 03.11.2023; принята к публикации 17.12.23.

REFERENCES

1. Glazovsky N.F., Armand A.D. *Mekhanizmy ustoychivosti geosistem* (Mechanisms of Stability of Geosystems), Moscow, 1992, 202 p. (in Russ.)
2. Kupriyanova T.P. *Faktyory i mekhanizmy ustoychivosti geosistem* (Factors and Mechanisms of Stability of Geosystems), Moscow, 1989, 333 p. (in Russ.)
3. Lara M., Doyen L. *Sustainable Management of Natural Resources. Mathematical models and methods*, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2008, 266 p.
4. Odum E.P. *Basic Ecology*, CBS College Publishing, 1983.
5. Alekseev A.S. et al. *Ustoychivoye upravleniye lesnym khozyaystvom: nauchnyye osnovy i kontseptsii* (Sustainable Forest Management: Scientific Foundations and Concepts), St. Petersburg, 1998, 222 p. (in Russ.)
6. Kerzhentsev A.S. *Funktsional'naya ekologiya* (Functional Ecology), Moscow, 2006, 259 p. (in Russ.)
7. Kolomyts E.G., Sharaya L.S. *Nazemnyye ekosistemy* (Terrestrial Ecosystems), 2014, pp. 93—107. (in Russ.)
8. Poluektov R.A., Pykh Yu.A., Shvytov I.A. *Dinamicheskiye modeli ekologicheskikh sistem* (Dynamic Models of Ecological Systems), Leningrad, 1980, 288 p. (in Russ.)
9. Semevsky F.N., Semenov S.M. *Matematicheskoye modelirovaniye ekologicheskikh protsessov* (Mathematical Modeling of Environmental Processes), Leningrad, 1982, 280 p. (in Russ.)
10. Khomyakov P.M., Ivanov V.D., Iskandaryan R.A. et al. *Geoekologicheskoye modelirovaniye dlya tseley upravleniya prirodopol'zovaniyem v usloviyakh izmeneniy prirodnoy sredy i klimata* (Geoecological Modeling for Environmental Management Purposes under Conditions of Environmental and Climate Change), Moscow, 2002, 400 p. (in Russ.)

11. Frelich L.E. *Forest Dynamics and Disturbance Regimes*, Cambridge, Cambridge University Press, 2002, 266 p.
12. Storozhenko V.G. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 2019, no. 4, pp. 87–97. (in Russ.)
13. Svirezhev Yu.M., Logofet D.O. *Ustoychivost' biologicheskikh soobshchestv* (Stability of Biological Communities), Moscow, 1978, 293 p. (in Russ.)
14. Kolomyts E.G., Kerzhentsev A.S., Sharaya L.S. *Uspekhi Sovremennoi Biologii*, 2015, no. 1(135), pp. 127–149. (in Russ.)
15. Kuznetsov V.I., Kozlov N.I., Khomyakov P.M. *Matematicheskoye modelirovaniye evolyutsii lesa dlya tseley upravleniya lesnym khozyaystvom* (Mathematical Modeling of Forest Evolution for Forest Management Purposes), Moscow, 2005, 232 p. (in Russ.)
16. *Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests*, The Montréal Process, October 2009, https://montreal-process.org/documents/publications/general/2009/2009p_4.pdf.
17. *Prikaz Rosleskhoz ot 05.02.98 N 21 "Ob utverzhdenii kriteriyev i indikatorov ustoychivogo upravleniya lesami Rossiyskoy Federatsii"* (Order of Rosleskhoz dated 02/05/98 N 21 "On approval of criteria and indicators for sustainable forest management of the Russian Federation"). (in Russ.)
18. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov* (Qualimetry of Models and Polymodel Complexes), Moscow, 2018, 314 p. (in Russ.)
19. Sokolov B., Zelentsov V.A., Nemykin S. *Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems*, 2016, vol. 466, pp. 391–401.
20. Keeney R.L., Raiffa H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, NY, Wiley, 1976.
21. Nogin V.D. *Prinyatiye resheniy v mnogokriterial'noy srede: kolichestvennyy podkhod* (Decision Making in a Multicriteria Environment: a Quantitative Approach), Moscow, 2005, 176 p. (in Russ.)
22. Podinovski V.V. *European Journal of Operational Research*, 2014, no. 2(239), pp. 537–541.
23. Pospelov D.A., ed., *Nechetkiye mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta* (Fuzzy Sets in Models of Control and Artificial Intelligence), Moscow, 1986, 312 p. (in Russ.)
24. Pavlov A.N., Sokolov B.V. *Prinyatiye resheniy v usloviyakh nechetkoy informatsii* (Decision Making under Conditions of Unclear Information), St. Petersburg, 2006, 72 p. (in Russ.)
25. Roy B. *Problems and methods with multiple objective functions* in *Mathematical Programming*, 1971, no. 1(2), pp. 239–266.
26. Steuer R.E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*, 1986, 546 p.
27. Larichev O.I. *Verbal'nyy analiz resheniy* (Verbal Analysis of Decisions), Moscow, 2006, 181 p. (in Russ.)
28. Mikhalevich V.S., Volkovich V.L. *Vychislitel'nyye metody issledovaniya i proyektirovaniya slozhnykh system* (Computational Methods for Studying and Designing Complex Systems), Moscow, 1982, 286 p. (in Russ.)
29. Pavlov A., Sokolov B., Pashchenko A., Shalyto A., Maklakov G. *Proceedings of the 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems*, 2016, pp. 402–408.
30. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Pavlov A.A., Slin'ko A.A. *Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). Vol. 2: Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems*, 2017, pp. 131–140.
31. Zelentsov V.A., Pavlov A.N. *Information and Control Systems*, 2010, no. 6, pp. 7–12. (in Russ.)
32. Pytyev Yu.P. *Vozmozhnost' kak al'ternativa veroyatnosti. Matematicheskiye i empiricheskiye osnovy, primeneniye* (Possibility as an Alternative to Probability. Mathematical and Empirical Foundations, Application), Moscow, 2007, 464 p. (in Russ.)
33. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. *Metody planirovaniya eksperimenta i obrabotki dannykh* (Methods of Experiment Planning and Data Processing), Samara, 2016. 131 p. (in Russ.)
34. Spesivtsev A.V. *Upravleniye riskami chrezvychaynykh situatsiy na osnove formalizatsii ekspertnoy informatsii* (Emergency Risk Management Based on Formalization of Expert Information), St. Petersburg, 2004, 238 p. (in Russ.)

Data on author

Vyacheslav A. Zelentsov — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com

Received 26.10.2023; approved after reviewing 03.11.2023; accepted for publication 17.12.23.

**СТАЦИОНАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ $M/G/1/m$
С УЧЕТОМ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ****А. И. ПЕСЧАНСКИЙ***Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия
peschansky_sntu@mail.ru*

Аннотация. Построена полумарковская модель функционирования однокомпонентной системы обслуживания с накопителем конечной емкости, в которой осуществляется контроль качества обслуживания заявок. В случае неудовлетворительного результата повторные обслуживания заявки проводятся до достижения удовлетворительного качества. Найдено стационарное распределение вложенной цепи Маркова, определены стационарные характеристики системы, зависящие от вероятности качественного обслуживания заявок: стационарное распределение очереди по времени, средние стационарные времена пребывания в состояниях, средняя длина очереди, среднее время пребывания заявки в очереди и системе.

Ключевые слова: однолинейная система обслуживания, конечное число мест для ожидания, контроль качества, повторное обслуживание, стационарные характеристики, финальная вероятность, время пребывания в состоянии, среднее число заявок

Ссылка для цитирования: Песчанский А. И. Стационарные характеристики системы $M/G/1/m$ с учетом контроля качества обслуживания // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 133—144. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-133-144.

**STATIONARY CHARACTERISTICS OF THE $M/G/1/m$ QUEUING SYSTEM
WITH REGARD TO SERVICE QUALITY CONTROL****A. I. Peschansky***Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
peschansky_sntu@mail.ru*

Abstract. A semi-Markov model is constructed to describe the functioning of a single-component servicing system with a storage device of finite capacity, in which the quality of service of requests is monitored. In case of an unsatisfactory result, repeated servicing of the application is carried out until satisfactory quality is achieved. The stationary distribution of the nested Markov chain is found, the stationary characteristics of the system are determined, depending on the probability of high-quality service of requests: stationary distribution of the queue over time, the average stationary sojourn times in states, the average queue length, the average request sojourn time in the queue and in the system.

Keywords: single-server queuing system, finite queue, quality control, re-service, stationary characteristics, final probabilities, sojourn times in states, average number of requests

For citation: Peschansky A. I. Stationary characteristics of the $M/G/1/m$ queuing system with regard to service quality control. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 133—144 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-133-144.

Введение. Задачам теории массового обслуживания посвящены многочисленные публикации. Обзор основных результатов по этой тематике можно найти, например, в книгах [1—7]. Многочисленные приложения теории диктуют необходимость дальнейших исследований в этом направлении. Так, при решении самого разного рода прикладных задач востребованы системы, в которых предъявляются высокие требования к качеству обслуживания. Поэтому возникает необходимость учитывать влияние повторного обслуживания на стационарные показатели систем. В такой постановке в [8, 9] изучена система $GI/G/1/0$ (в классификации Кендалла—Башарина [10]). В [11] исследована одноканальная система с

простейшим входящим потоком и накопителем неограниченной емкости. Настоящая статья является продолжением исследований автора [11] для случая системы с накопителем ограниченной емкости.

Постановка задачи. Рассмотрим систему, в которой имеется один обслуживающий прибор и m мест для ожидания. Входящий поток заявок простейший: время β между моментами поступления заявок имеет функцию распределения (ФР) $G(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ и плотность $g(t) = e^{-\lambda t}$, $t > 0$. Распределение длительности α обслуживания заявок произвольно с ФР $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$, плотностью $f(t)$ и конечным математическим ожиданием $M\alpha$. По завершении обслуживания каждой заявки в системе проводится мгновенный контроль качества ее обслуживания. В случае неудовлетворительного качества заявка сразу направляется на повторное обслуживание, длительность γ которого имеет ФР $\Phi(t) = P\{\gamma \leq t\}$, плотность $\varphi(t)$ и конечное математическое ожидание $M\gamma$. Повторное обслуживание проводится до тех, пока качество обслуживания не будет признано удовлетворительным. Предполагается, что вероятность успешного прохождения контроля, как после первого, так и после повторных обслуживаний заявок, равна p .

Цель настоящей статьи — обобщить математическую модель системы $M/G/1/m$ на случай наличия в последней устройства контроля качества обслуживания заявок и установить зависимость стационарных характеристик системы от вероятности качественного обслуживания.

Построение полумарковской модели функционирования системы. Математическую модель функционирования системы построим с помощью аппарата полумарковских процессов с дискретно-непрерывным множеством фазовых состояний [12, 13]. Введем в рассмотрение фазовое пространство E полумарковского процесса $S(t)$:

$$E = \left\{ 0; 1_1; 1_2; 1_1/k, k = \overline{0, m-1}; 1_2/k, k = \overline{0, m}; 1_1x/k, 1_2x/k, k = \overline{1, m} \right\}.$$

Здесь коды состояний имеют следующий смысл:

0 — в системе отсутствуют заявки;

1_1 — прибор начал обслуживать заявку, поступившую в свободную систему, первый раз; 1_2 — повторно;

$1_1/k$ — прибор первый раз начал обслуживать заявку из очереди, в которой осталось k заявок, $k = \overline{0, m-1}$;

$1_2/k$ — прибор повторно начал обслуживать заявку из очереди, в которой находится k заявок, $k = \overline{0, m}$.

$1_1x/k$ — прибор занят первым ($1_2x/k$ — повторным) обслуживанием заявки, до проведения контроля качества обслуживания осталось время x ; поступившая в систему заявка принята в очередь, в которой стало k заявок, $k = \overline{1, m}$.

Время пребывания системы θ в описанных состояниях задается формулами:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \beta, \quad \theta_{1_1} = \theta_{1_1/k} = \beta \wedge \alpha, \quad k = \overline{0, m-1}; \quad \theta_{1_2} = \theta_{1_2/k} = \beta \wedge \gamma, \quad k = \overline{0, m-1}; \\ \theta_{1_2/m} &= \gamma; \quad \theta_{1_1x/k} = \theta_{1_2x/k} = \beta \wedge x, \quad k = \overline{1, m-1}; \quad \theta_{1_1x/m} = \theta_{1_2x/m} = x, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\wedge$ — знак минимума.

Под физическими состояниями системы будем понимать количество заявок в системе и характер их обслуживания. Вероятность переходов вложенной цепи Маркова зависит от реализации минимума факторов, которые влияют на изменение физических состояний. Например, в случае $\beta < x$ система из состояния $1_1x/k$, $k = \overline{1, m-1}$ переходит в состояние $1_1y/k+1$ с плотностью вероятности перехода

$$p\{1_1 x/k \rightarrow 1_1 y/k+1\} = g(x-y), \quad 0 < y < x.$$

Если $\beta > x$, то система переходит в состояние $1_1/k-1$ или $1_2/k$ соответственно с вероятностью

$$P\{1_1 x/k \rightarrow 1_1/k-1\} = p\bar{G}(x), \quad P\{1_1 x/k \rightarrow 1_2/k\} = q\bar{G}(x), \quad \bar{G}(x) = 1 - G(x) = e^{-\lambda x}.$$

Стационарное распределение вложенной цепи Маркова. Обозначим ρ_{1_1} , ρ_{1_2} , $\rho_{1_1/k}$, $\rho_{1_2/k}$ и $\rho(1_1 x/k)$, $\rho(1_2 x/k)$ — стационарные вероятности и стационарные плотности соответствующих состояний. Для рассматриваемой модели стационарное распределение удовлетворяет следующей совокупности систем интегральных уравнений:

$$\begin{cases} \rho(1_1 x/1) = (\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) \int_0^\infty g(t) f(t+x) dt, \\ \rho(1_1 x/k) = \int_0^\infty g(t) \rho(1_1, t+x/k-1) dt + \rho_{1_1/k-1} \int_0^\infty g(t) f(t+x) dt, \quad k = \overline{2, m}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \rho(1_2 x/1) = (\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0}) \int_0^\infty g(t) \varphi(t+x) dt, \\ \rho(1_2 x/k) = \int_0^\infty g(t) \rho(1_2, t+x/k-1) dt + \rho_{1_2/k-1} \int_0^\infty g(t) \varphi(t+x) dt, \quad k = \overline{2, m}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \rho_{1_1} = \rho_0; \quad \rho_0 = p \left[(\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) \int_0^\infty \bar{G}(x) f(x) dx + (\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0}) \int_0^\infty \bar{G}(x) \varphi(x) dx \right], \\ \rho_{1_1/k} = p \int_0^\infty \bar{G}(x) [\rho(1_1 x/k+1) + \rho(1_2 x/k+1)] dx + p \int_0^\infty \bar{G}(x) [\rho_{1_1/k+1} f(x) + \rho_{1_2/k+1} \varphi(x)] dx, \quad k = \overline{0, m-2}, \\ \rho_{1_1/m-1} = p \int_0^\infty [\rho(1_1 x/m) + \rho(1_2 x/m)] dx + p \rho_{1_2/m}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \rho_{1_2} = q \rho_{1_1} \int_0^\infty \bar{G}(x) f(x) dx + q \rho_{1_2} \int_0^\infty \bar{G}(x) \varphi(x) dx, \\ \rho_{1_2/0} = q \int_0^\infty \bar{G}(x) [\rho_{1_1/0} f(x) + \rho_{1_2/0} \varphi(x)] dx, \\ \rho_{1_2/k} = q \int_0^\infty \bar{G}(x) [\rho(1_1 x/k) + \rho(1_2 x/k)] dx + q \int_0^\infty \bar{G}(x) [\rho_{1_1/k} f(x) + \rho_{1_2/k} \varphi(x)] dx, \quad k = \overline{1, m-1}, \\ \rho_{1_2/m} = q \int_0^\infty [\rho(1_1 x/m) + \rho(1_2 x/m)] dx + q \rho_{1_2/m}. \end{cases} \quad (5)$$

Выпишем следствия систем (2)–(5), которые будут использованы при нахождении как стационарного распределения вложенной цепи Маркова, так и стационарных показателей системы обслуживания:

$$\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0} = qp^{-1} \rho_{1_1}; \quad \rho_{1_2/k} = qp^{-1} \rho_{1_1/k-1}, \quad k = \overline{1, m}; \quad (6)$$

$$\int_0^\infty [\rho(1_1 x/k) + \rho(1_2 x/k)] dx = \rho_{1_1/k-1}, \quad k = \overline{1, m}; \quad (7)$$

$$(\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) \int_0^\infty G(x) f(x) dx + (\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0}) \int_0^\infty G(x) \varphi(x) dx = \rho_{1_1/0}; \quad (8)$$

$$\int_0^{\infty} G(x)[\rho(1_1 x/k) + \rho(1_2 x/k)]dx + \rho_{1_1/k} \int_0^{\infty} G(x)f(x)dx + \rho_{1_2/k} \int_0^{\infty} G(x)\varphi(x)dx = \rho_{1_1/k}, k = \overline{1, m-1}. \quad (9)$$

Далее из уравнений систем (2) и (3) выразим стационарные плотности $\rho(1_1 x/k)$ и $\rho(1_2 x/k)$ через стационарные вероятности ρ_{1_1} ; ρ_{1_2} ; $\rho_{1_1/k}$ и $\rho_{1_2/k}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(1_1 x/1) = (\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) \int_0^{\infty} g(t)f(t+x)dt; \quad \rho(1_2 x/1) = (\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0}) \int_0^{\infty} g(t)\varphi(t+x)dt; \\ \rho(1_1 x/k) = \rho_{1_1} \int_0^{\infty} g^{*(k)}(t)f(t+x)dt + \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_1/i} \int_0^{\infty} g^{*(k-i)}(t)f(t+x)dt, \quad k = \overline{2, m}; \\ \rho(1_2 x/k) = \rho_{1_2} \int_0^{\infty} g^{*(k)}(t)\varphi(t+x)dt + \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_2/i} \int_0^{\infty} g^{*(k-i)}(t)\varphi(t+x)dt, \quad k = \overline{2, m}, \end{array} \right. \quad (10)$$

где $g^{*(j)}(t) = \lambda \frac{(\lambda t)^{j-1}}{(j-1)!} e^{-\lambda t}$. Учитывая (6) и соотношения

$$\int_0^{\infty} G(x)\rho(1_1 x/k)dx = \rho_{1_1} F_k + \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_1/i} F_{k-i}; \quad \int_0^{\infty} G(x)\rho(1_2 x/k)dx = \rho_{1_2} \Phi_k + \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_2/i} \Phi_{k-i}, \quad (11)$$

из уравнений (8) и (9) найдем рекуррентные формулы для определения стационарных вероятностей физических состояний системы с точностью до произвольной постоянной ρ_0 :

$$\rho_{1_1} = \rho_0, \quad \rho_{1_1/0} = \frac{\rho_0}{p f_0} [p F_0 + q \Phi_0], \quad (12)$$

$$\rho_{1_1/k} = \frac{1}{p f_0} [\rho_{1_1} (p F_k + q \Phi_k) + \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_1/i} (p F_{k-i} + q \Phi_{k-i-1})], \quad k = \overline{1, m}, \quad (13)$$

$$\rho_{1_2} = \rho_0 \frac{q f_0}{p + q \Phi_0}, \quad \rho_{1_2/0} = \rho_0 \frac{q}{p} \frac{p F_0 + q \Phi_0}{p + q \Phi_0}, \quad \rho_{1_2/k} = \frac{q}{p} \rho_{1_1/k-1}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (14)$$

Здесь F_i — вероятность того, что за время первого (Φ_i — повторного) обслуживания заявки в систему поступит более, чем i новых заявок:

$$F_i = \lambda \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \overline{F}(t) dt, \quad \Phi_i = \lambda \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \overline{\Phi}(t) dt, \quad f_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} f(t) dt.$$

Стационарная вероятность ρ_0 находится из условия нормировки, которое с учетом соотношений (6) и (7) принимает вид

$$\rho_0 + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} = p/(p+1).$$

Финальные вероятности физических состояний. Обозначим через E_k подмножество состояний фазового пространства E , где индекс k указывает на количество заявок в системе:

$$E_0 = \{0\}, \quad E_1 = \{1_1, 1_2, 1_1/0, 1_2/0\}; \quad E_k = \{1_1/k-1, 1_2/k-1, 1_1 x/k-1, 1_2 x/k-1\}, \quad k = \overline{2, m};$$

$$E_{m+1} = \{1_2/m, 1_1 x/m, 1_2 x/m\}; \quad E = \bigcup_{k=0}^{m+1} E_k.$$

Финальные вероятности π_k пребывания системы в подмножествах состояний E_k найдем с помощью предельных соотношений [12, 13]:

$$\pi_k = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{S(t) \in E_k / S(0) = e\} = \int_{E_k} m(e) \rho(de) \left(\int_E m(e) \rho(de) \right)^{-1}, \quad k = \overline{0, m+1}. \quad (15)$$

Здесь $t(x)$ — среднее время пребывания системы в состоянии $x \in E$, $\rho(\cdot)$ — стационарное распределение вложенной цепи Маркова.

Средние времена пребывания рассматриваемой системы в состояниях:

$$\begin{aligned} M\theta_0 &= M\beta; \quad M\theta_{1_1} = M\theta_{1_1/k} = \int_0^\infty \bar{F}(x)\bar{G}(x)dx = M\beta F_0, \quad k = \overline{0, m-1}; \\ M\theta_{1_2} &= M\theta_{1_2/k} = \int_0^\infty \bar{\Phi}(x)\bar{G}(x)dx = M\beta\Phi_0, \quad k = \overline{0, m-1}; \quad M\theta_{1_2/m} = M\gamma; \\ M\theta_{1_{1x/k}} &= M\theta_{1_{2x/k}} = \int_0^x \bar{G}(x)dx, \quad k = \overline{1, m-1}; \quad M\theta_{1_{1x/m}} = M\theta_{1_{2x/m}} = x. \end{aligned}$$

Преобразуем интегралы в формуле (15), используя выражения для средних значений времени, а также соотношения (8), (9), и учитывая, что

$$\int_0^x \bar{G}(x)dx = M\beta G(x), \quad \bar{G}(x) = M\beta g(x), \quad (16)$$

в результате получим

$$\begin{aligned} \int_{E_0} m(e)\rho(de) &= M\beta\rho_0; \\ \int_{E_1} m(e)\rho(de) &= (\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) \int_0^\infty \bar{G}(x)\bar{F}(x)dx + (\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0}) \int_0^\infty \bar{G}(x)\bar{\Phi}(x)dx = \\ &= M\beta \left[(\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) \int_0^\infty G(x)f(x)dx + (\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0}) \int_0^\infty G(x)\varphi(x)dx \right] = M\beta\rho_{1_1/0}; \\ \int_{E_k} m(e)\rho(de) &= \int_0^\infty [\rho(1_1x/k-1) + \rho(1_2x/k-1)]dx \int_0^x \bar{G}(t)dt + \\ &+ \rho_{1_1/k-1} \int_0^\infty \bar{G}(x)\bar{F}(x)dx + \rho_{1_2/k-1} \int_0^\infty \bar{G}(x)\bar{\Phi}(x)dx = M\beta\rho_{1_1/k-1}, \quad k = \overline{2, m}. \end{aligned}$$

При нахождении выражения для $\int_{E_{m+1}} m(e)\rho(de)$ дополнительно используем соотношения

ния

$$\int_0^\infty x[\rho(1_1x/k) + \rho(1_2x/k)]dx = \left[\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_1/i} \right] M\alpha + \left[\rho_{1_2} + \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_2/i} \right] M\gamma - M\beta \sum_{i=0}^{k-1} \rho_{1_1/i}, \quad k = \overline{1, m}, \quad (17)$$

которые получаются в результате интегрирования обеих частей уравнений систем (2) и (3) в пределах от x до ∞ , использования соотношений (16), (8), (9) и рекуррентной формулы

$$\begin{aligned} \int_0^\infty x[\rho(1_1x/k) + \rho(1_2x/k)]dx &= \int_0^\infty x[\rho(1_1x/k-1) + \rho(1_2x/k-1)]dx + \rho_{1_1/k-1}M\alpha + \rho_{1_2/k-1}M\gamma - \\ &- M\beta \left[\int_0^\infty G(x)[\rho(1_1x/k-1) + \rho(1_2x/k-1)]dx + \rho_{1_1/k-1} \int_0^\infty G(x)f(x)dx + \rho_{1_2/k-1} \int_0^\infty G(x)\varphi(x)dx \right]. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\int_{E_{m+1}} m(e)\rho(de) = \int_0^\infty x[\rho(1_1x/m) + \rho(1_2x/m)]dx + M\gamma\rho_{1_2/m} = \left[\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right] M\alpha +$$

$$+ \left[\rho_{1_2} + \sum_{i=0}^m \rho_{1_2/i} \right] M \gamma - M \beta \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} = \left[\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right] (M \alpha + q p^{-1} M \gamma) - M \beta \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i};$$

$$\int_E m(e) \rho(de) = M \beta \rho_0 + \left(M \alpha + q p^{-1} M \gamma \right) \left[\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right].$$

Обозначим

$$\tilde{\rho}_{1_1/i} = \rho_{1_1/i} \rho_0^{-1}, \quad \rho = \lambda M \alpha, \quad \delta = \lambda M \gamma, \quad (18)$$

тогда соотношения (15) для определения финальных вероятностей состояний системы принимают вид

$$\pi_0 = \left[1 + (\rho + q p^{-1} \delta) \left(1 + \sum_{i=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/i} \right) \right]^{-1}, \quad \pi_k = \pi_0 \tilde{\rho}_{1_1/k-1}, \quad k = \overline{1, m}; \quad \pi_{m+1} = 1 - \pi_0 \left(1 + \sum_{i=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/i} \right). \quad (19)$$

Заметим, что значения $\tilde{\rho}_{1_1/i}$ можно вычислить с помощью формул (12)–(14), в которых следует положить $\rho_0 = 1$. Если в системе отсутствует устройство контроля качества обслуживания заявок ($q = 0$), то соотношения (19) совпадают с известными формулами (см., например, в [1]).

Далее найдем стационарные вероятности состояний: прибор обслуживает заявку впервые, прибор обслуживает заявку повторно. Для этого представим фазовое пространство в виде объединения трех непересекающихся подпространств: $E = E_0 \cup E_{1_1} \cup E_{1_2}$, где E_0 — прибор свободен; $E_{1_1} = \{1_1; 1_1/k, k = \overline{0, m-1}; 1_1 x/k, k = \overline{1, m}\}$ — прибор обслуживает заявку впервые; $E_{1_2} = \{1_2; 1_2/k, k = \overline{0, m}; 1_2 x/k, k = \overline{1, m}\}$ — прибор обслуживает заявку повторно.

Финальные вероятности π_{1_1} и π_{1_2} пребывания системы соответственно в подмножествах состояний E_{1_1} и E_{1_2} найдем с помощью (15).

Учитывая соотношения (16), (10) и (11), получим

$$\int_{E_{1_1}} m(e) \rho(de) = (\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i}) \int_0^\infty \bar{G}(x) \bar{F}(x) dx + \sum_{k=1}^{m-1} \int_0^\infty \rho(1_1 x/k) dx \int_0^x \bar{G}(t) dt + \int_0^\infty x \rho(1_1 x/m) dx =$$

$$= M \alpha \left(\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right).$$

Аналогично

$$\int_{E_{1_2}} m(e) \rho(de) = M \gamma (\rho_{1_2} + \sum_{i=0}^m \rho_{1_2/i}) = \frac{q}{p} M \gamma \left(\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right).$$

Следовательно,

$$\pi_{1_1} = \rho \left(1 + \sum_{i=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/i} \right) \pi_0; \quad \pi_{1_2} = q \delta (p \rho)^{-1} \pi_{1_1}. \quad (20)$$

Среднее значение стационарного времени пребывания системы в рассматриваемых состояниях. Для определения средних значений стационарного времени $T(E_k)$ пребывания системы в состояниях E_k воспользуемся соотношениями [12, 13]:

$$T(E_k) = \int_{E_k} m(e) \rho(de) \left[\int_{E \setminus E_k} \rho(de) P(e, E_k) \right]^{-1}, \quad k = \overline{0, m+1}, \quad (21)$$

где $P(e, E_k)$ — вероятность переходов из состояния e в подмножество состояний E_k .

В результате преобразований интегралов из (21) с учетом вероятностей переходов системы из состояний, соотношений (4) и (6)—(9) получаем

$$\begin{aligned} \int_{E \setminus E_k} \rho(de)P(e, E_k) &= \int_{E_k} \rho(de)P(e, E_{k-1}) + \int_{E_k} \rho(de)P(e, E_{k+1}) = \\ &= p \int_0^\infty \bar{G}(x)[\rho(1_1 x / k - 1) + \rho(1_2 x / k - 1)]dx + p \int_0^\infty \bar{G}(x)[\rho_{1_1/k-1} f(x) + \rho_{1_2/k-1} \varphi(x)]dx + \\ &+ \int_0^\infty G(x)[\rho(1_1 x / k - 1) + \rho(1_2 x / k - 1)]dx + \rho_{1_1/k-1} \int_0^\infty G(x)f(x)dx + \rho_{1_2/k-1} \int_0^\infty G(x)\varphi(x)dx = \\ &= \rho_{1_1/k-2} + \rho_{1_1/k-1}, \quad k = \overline{2, m}; \\ \int_{E \setminus E_1} \rho(de)P(e, E_1) &= \rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}; \quad \int_{E \setminus E_{m+1}} \rho(de)P(e, E_{m+1}) = \rho_{1_1/m-1}. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$T(E_0) = 1/\lambda; \quad T(E_1) = \frac{\tilde{\rho}_{1_1/0}}{\lambda(1 + \tilde{\rho}_{1_1/0})}; \quad T(E_k) = \frac{\tilde{\rho}_{1_1/k-1}}{\lambda(\tilde{\rho}_{1_1/k-2} + \tilde{\rho}_{1_1/k-1})}, \quad k = \overline{2, m}; \quad (22)$$

$$T(E_{m+1}) = \frac{1}{\lambda \tilde{\rho}_{1_1/m-1}} \left[(p + qp^{-1}\delta) \left(1 + \sum_{i=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/i} \right) - \sum_{i=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/i} \right].$$

Средние значения стационарного времени пребывания системы в подмножествах состояний E_{1_1} и E_{1_2} также найдем с помощью соотношений (21). Для этого вычислим значение интеграла

$$\begin{aligned} \int_{E \setminus E_{1_1}} \rho(de)P(e, E_{1_1}) &= \int_{E_{1_1}} \rho(de)P(e, E_0) + \int_{E_{1_1}} \rho(de)P(e, E_{1_2}) = \\ &= (\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) \int_0^\infty \bar{G}(x)f(x)dx + q \sum_{k=1}^{m-1} \left[\int_0^\infty \bar{G}(x)\rho(1_1 x / k)dx + \rho_{1_1/k} \int_0^\infty \bar{G}(x)f(x)dx \right] + q \int_0^\infty \rho(1_1 x / m)dx. \end{aligned}$$

Воспользуемся соотношением

$$\sum_{k=1}^{m-1} \int_0^\infty \bar{G}(x)\rho(1_1 x / k)dx + \int_0^\infty \bar{G}(x)f(x)dx \left[\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right] + \int_0^\infty \rho(1_1 x / m)dx = \rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i},$$

которое получается в результате почленного сложения всех уравнений системы (2), а затем интегрирования обеих частей полученного равенства в пределах от 0 до ∞ . В результате преобразований окончательно получим

$$\int_{E \setminus E_{1_1}} \rho(de)P(e, E_{1_1}) = (p + q\Phi_0)\rho_0 + q \left[\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right].$$

Аналогично находим

$$\int_{E \setminus E_{1_2}} \rho(de)P(e, E_{1_2}) = \int_{E_{1_1}} \rho(de)P(e, E_{1_2}) = q \left[\rho_{1_1} + \sum_{i=0}^{m-1} \rho_{1_1/i} \right].$$

Следовательно,

$$T(E_{1_1}) = \frac{M\alpha \left[1 + \sum_{i=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/i} \right]}{p + q\Phi_0 + q \left[1 + \sum_{i=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/i} \right]}; \quad T(E_{1_2}) = \frac{1}{p} M \gamma. \quad (23)$$

Среднее число заявок в системе и очереди в стационарном режиме. Одной из важных характеристик обслуживания является среднее число заявок $\bar{N}_c$ в системе, функционирующей в стационарном режиме. Найдем значение этой характеристики, учитывая финальные вероятности состояний (19):

$$\bar{N}_c = \sum_{k=1}^{m+1} k\pi_k = \pi_0 \sum_{k=1}^m k\tilde{\rho}_{1_1/k-1} + (m+1)\pi_{m+1} = \pi_0 \sum_{j=0}^{m-1} (j+1)\tilde{\rho}_{1_1/j} + (m+1)(1-\pi_0 - \pi_0 \sum_{j=0}^{m-1} \tilde{\rho}_{1_1/j}).$$

Таким образом,

$$\bar{N}_c = (m+1)(1-\pi_0) - \pi_0 \sum_{j=0}^{m-1} (m-j)\tilde{\rho}_{1_1/j}. \quad (24)$$

Другой важной характеристикой является длина очереди, т.е. число ожидающих начала обслуживания заявок. Среднее значение $\bar{N}_{оч}$ этого показателя описывается формулой

$$\bar{N}_{оч} = \sum_{k=2}^{m+1} (k-1)\pi_k = \bar{N}_c - (1-\pi_0) = m(1-\pi_0) - \pi_0 \sum_{j=0}^{m-1} (m-j)\tilde{\rho}_{1_1/j}. \quad (25)$$

Среднее стационарное время пребывания в очереди и системе. Наряду с характеристиками (24) и (25) важным показателем производительности системы обслуживания является время пребывания заявки в очереди и системе. Время пребывания заявки в очереди складывается из полного времени дообслуживания прибором заявки ς и полного времени обслуживания заявок, уже находящихся в очереди. Здесь под полным временем понимается время пребывания заявки в приборе с учетом возможных повторных обслуживаний. Среднее значение времени ς найдем по формуле $M\varsigma = \sum_{k=1}^m \pi_k M\varsigma_k$, где $M\varsigma_k$ — математическое ожидание

полного времени дообслуживания заявки с момента, когда поступившая в систему заявка заняла k -е место в очереди. Значения среднего полного времени дообслуживания $M\varsigma_{1_1 x/k}$ и $M\varsigma_{1_2 x/k}$ с начальными состояниями $1_1 x/k$ и $1_2 x/k$ соответственно нетрудно установить с помощью тождества Вальда [14]: $M\varsigma_{1_1 x/k} = M\varsigma_{1_2 x/k} = x + qp^{-1}M\gamma$.

Значение $M\varsigma_k$, не зависящее от непрерывной компоненты x , найдем с помощью операции усреднения. С этой целью представим фазовое пространство состояний процесса объединением двух непересекающихся подмножеств:

$$E = E_{\geq k}^+ \cup E_{\geq k}^-, \quad E_{\geq k}^+ = \{ 1_1 x/j, 1_2 x/j, 1_2 /j; k \leq j \leq m \}, \quad E_{\geq k}^- = E \setminus E_{\geq k}^+, \quad k = \overline{1, m}.$$

Заметим, что $\varsigma_{1_1 x/k}$ ($\varsigma_{1_2 x/k}$) — время с момента попадания системы в состояние $1_1 x/k$ ($1_2 x/k$) до момента первого выхода из подмножества $E_{\geq k}^+$.

Операцию усреднения проведем по формуле [15]:

$$M\varsigma_k = \frac{\int_{E_{\geq k}^-} \rho(dy) \int_{E_{\geq k}^+} M\varsigma_x P(y, dx)}{\int_{E_{\geq k}^-} \rho(dx) P(x, E_{\geq k}^+)}, \quad (26)$$

где $M\varsigma_x$ — среднее время пребывания системы в состоянии $E_{\geq k}^+$ с начальным состоянием x .

Сначала найдем значения интегралов в знаменателе дроби (26) (учитывая (8) и (9)):

$$\int_{E_{\geq 1}^-} \rho(dx) P(x, E_{\geq 1}^+) = (\rho_{1_1} + \rho_{1_1/0}) P(\alpha > \beta) + (\rho_{1_2} + \rho_{1_2/0}) P(\gamma > \beta) = \rho_{1_1/0},$$

$$\int_{E_{\geq k}^-} \rho(dx) P(x, E_{\geq k}^+) = \int_0^\infty G(x) [\rho(1_1 x/k - 1) + \rho(1_2 x/k - 1)] dx +$$

$$+ \rho_{1_1/k-1} \int_0^\infty G(x) f(x) dx + \rho_{1_2/k-1} \int_0^\infty G(x) \varphi(x) dx = \rho_{1_1/k-1}, \quad k = \overline{2, m}.$$

Принимая во внимание (19), получим

$$M\zeta = \sum_{k=1}^m \pi_k M \zeta_k = \frac{\pi_0}{\rho_0} \sum_{k=1}^m \int_{E_{\geq k}^-} \rho(dy) \int_{E_{\geq k}^+} M \zeta_x P(y, dx) =$$

$$= \frac{\pi_0}{\rho_0} \left(\rho_{1_1} + \sum_{j=0}^{m-1} \rho_{1_1/j} \right) \int_0^\infty (x + qp^{-1} M\gamma) dx \int_0^\infty g(t) f(t+x) dt +$$

$$+ \frac{\pi_0}{\rho_0} \left(\rho_{1_2} + \sum_{j=0}^{m-1} \rho_{1_2/j} \right) \int_0^\infty (x + qp^{-1} M\gamma) dx \int_0^\infty g(t) \varphi(t+x) dt +$$

$$+ \frac{\pi_0}{\rho_0} \sum_{k=1}^{m-1} \int_0^\infty [\rho(1_1 y/k) + \rho(1_2 y/k)] dy \int_0^y g(y-x) (x + qp^{-1} M\gamma) dx.$$

Поскольку

$$\int_0^y xg(y-x) dx = y - \int_0^y \overline{G}(t) dt = y - M\beta G(y),$$

$$\int_0^\infty x dx \int_0^\infty g(t) f(t+x) dt = M\alpha - M\beta \int_0^\infty G(x) f(x) dx,$$

$$\int_0^\infty x dx \int_0^\infty g(t) \varphi(t+x) dt = M\gamma - M\beta \int_0^\infty G(x) \varphi(x) dx,$$

то, учитывая формулы (6), (8), (9) и (17), найдем

$$\frac{\rho_0}{\pi_0} M\zeta = \sum_{k=1}^{m-1} \int_0^\infty y [\rho(1_1 y/k) + \rho(1_2 y/k)] dy + M\alpha \left(\rho_{1_1} + \sum_{j=0}^{m-1} \rho_{1_1/j} \right) + M\gamma \left(\rho_{1_2} + \sum_{j=0}^{m-1} \rho_{1_2/j} \right) -$$

$$- (M\beta - qp^{-1} M\gamma) \left[\sum_{k=1}^{m-1} \int_0^\infty G(y) [\rho(1_1 y/k) + \rho(1_2 y/k)] dy + \left(\rho_{1_1} + \sum_{j=0}^{m-1} \rho_{1_1/j} \right) \int_0^\infty G(x) f(x) dx + \right.$$

$$\left. + \left(\rho_{1_2} + \sum_{j=0}^{m-1} \rho_{1_2/j} \right) \int_0^\infty G(x) \varphi(x) dx \right] = (M\alpha + qp^{-1} M\gamma) \sum_{k=1}^m \left[\rho_{1_1} + \sum_{j=0}^{k-1} \rho_{1_1/j} \right] - M\beta \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^{k-1} \rho_{1_1/j} =$$

$$= (M\alpha + qp^{-1} M\gamma) \left[m\rho_{1_1} + \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^{k-1} \rho_{1_1/j} \right] - M\beta \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^{k-1} \rho_{1_1/j}.$$

В результате замены порядка суммирования с учетом обозначений (18) окончательно получим

$$M\zeta = \pi_0 M\beta \left[m(\rho + qp^{-1} \delta) + (\rho + qp^{-1} \delta - 1) \sum_{j=0}^{m-1} (m-j) \tilde{\rho}_{1_1/j} \right]. \quad (27)$$

Теперь определим среднее время пребывания заявки в очереди в стационарном режиме:

$$\overline{T}_{\text{оч}} = M\zeta + (M\alpha + qp^{-1} M\gamma) \sum_{k=2}^m (k-1) \pi_k = M\zeta + (M\alpha + qp^{-1} M\gamma) (\overline{N}_{\text{оч}} - m\pi_{m+1}) =$$

$$= \pi_0 M \beta \left[m(\rho + q\rho^{-1}\delta) \left(\rho_{1_1} + \sum_{j=0}^{m-1} \rho_{1_1/j} \right) - \sum_{j=0}^{m-1} (m-j) \tilde{\rho}_{1_1/j} \right].$$

Таким образом,

$$\bar{T}_{\text{оч}} = M \beta \left[m(1 - \pi_0) - \pi_0 \sum_{j=0}^{m-1} (m-j) \tilde{\rho}_{1_1/j} \right]. \quad (28)$$

Очевидно, что среднее время пребывания заявки в системе

$$\bar{T}_c = M \zeta + (M\alpha + q\rho^{-1}M\gamma) \left(\pi_0 + \sum_{k=1}^m k\pi_k \right) = \bar{T}_{\text{оч}} + (M\alpha + q\rho^{-1}M\gamma)(1 - \pi_{m+1}).$$

Учитывая соотношения (28) и (19), окончательно получим

$$\bar{T}_c = M \beta \left[(m+1)(1 - \pi_0) - \pi_0 \sum_{j=0}^{m-1} (m-j) \tilde{\rho}_{1_1/j} \right]. \quad (29)$$

Полученные выражения для вычисления стационарных характеристик системы позволяют оценить зависимость показателей производительности системы от вероятности p удовлетворительного обслуживания заявки.

Численный пример. Рассмотрим систему $M/G/1/3$, в которую с интенсивностью $\lambda = 0,6 \text{ мин}^{-1}$ поступает простейший поток заявок. Среднее значение времени первого обслуживания заявки $M\alpha = 1,949$ мин имеет распределение Вейбулла—Гнеденко с ФР $F(t) = 1 - e^{-(t/2,2)^{2,1}}$. Качество обслуживания заявки признается удовлетворительным с вероятностью $p = 0,9$. Среднее время повторного обслуживания заявки $M\gamma = 1,378$ мин имеет гиперэкспоненциальное распределение с плотностью $\varphi(t) = 0,15e^{-0,5t} + 0,07e^{-0,1t}$. Стационарные характеристики системы, вычисленные по формулам (19), (20), (22)—(25), (28) и (29), приводятся в табл. 1—3.

Таблица 1

Система	π_0	π_1	π_2	π_3	π_4	π_{1_1}	π_{1_2}
С контролем качества	0,074	0,140	0,213	0,308	0,266	0,859	0,067
Без контроля качества	0,093	0,163	0,226	0,295	0,224	0,907	—

Таблица 2

Система	$T(E_0)$, мин	$T(E_1)$, мин	$T(E_2)$, мин	$T(E_3)$, мин	$T(E_4)$, мин	$T(E_{1_1})$, мин	$T(E_{1_2})$, мин
С контролем качества	1,667	1,092	1,004	0,986	1,439	9,992	1,531
Без контроля качества	1,667	1,063	0,967	0,944	1,265	16,540	—

Таблица 3

Система	$\bar{N}_{\text{оч}}$	$\bar{T}_{\text{оч}}$, мин	$\bar{N}_c$	$\bar{T}_c$, мин
С контролем качества	1,625	2,708	2,551	4,251
Без контроля качества	1,487	2,478	2,394	3,990

Из приведенных в табл. 1—3 расчетных данных следует, что наличие в системе устройства контроля качества увеличивает вероятность отказа в обслуживании заявки на 18,75 %, время пребывания в очереди — на 9,282 %, а время пребывания в системе — на 6,541 %.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости соответственно вероятности $\pi_4(p)$ отказа в обслуживании и среднего стационарного времени $\bar{T}_{\text{оч}}(p)$ пребывания в очереди от вероятности p успешного обслуживания заявок.

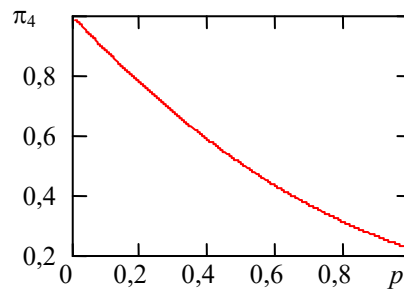


Рис. 1

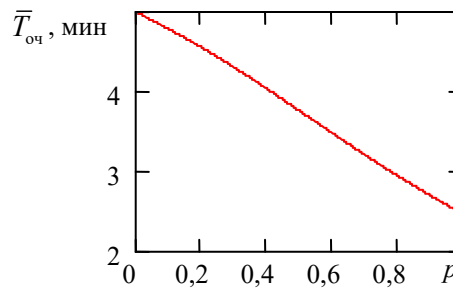


Рис. 2

Заключение. Построен полумарковский процесс функционирования одноканальной системы обслуживания с конечной очередью, в которой обслуживание заявки прибором проводится до тех пор, пока его качество не будет признано удовлетворительным. Полученные расчетные формулы для вычисления стационарных характеристик системы позволяют оценить влияние вероятности качественного обслуживания заявок на показатели системы. Результаты статьи могут быть использованы для более адекватного описания функционирования современных технических и информационных систем в самых различных предметных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров П. П., Печинкин А. В. Теория массового обслуживания. М.: Изд-во РУДН, 1995. 529 с.
2. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1987. 336 с.
3. Климов Г. П. Стохастические системы обслуживания. М.: Наука, 1966. 244 с.
4. Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания // Итоги науки. Серия „Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. 1970“. 1971. С. 5—109.
5. Матвеев В. Ф., Ушаков В. Г. Системы массового обслуживания. М.: Изд-во МГУ, 1984. 240 с.
6. Боровков А. А. Вероятностные процессы в теории массового обслуживания. М.: Наука, 1971. 368 с.
7. Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания. М.: Высш. школа, 1982. 256 с.
8. Peschansky A. I. Stationary Characteristics of the Single-Server Queue System with Losses and Immediate Service Quality Control // Appl. Mathematics. 2011. Vol. 2, N 4. P. 403—409. DOI: 10.4236/am.2011.24049.
9. Песчанский А. И. Полумарковская модель однолинейной системы с потерями и мгновенным контролем качества обслуживания // Вестн. СевНТУ: Сер. Информатика, электроника, связь. 2011. Вып. 114. С. 47—52.
10. Kendall D. Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain // Ann. Math. Statistics. 1953. Vol. 24, N 3. P. 338—354.

11. Песчанский А. И. Стационарные характеристики одноканальной системы с неограниченной очередью и учетом контроля качества обслуживания // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 715—730. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-715-730.
12. Королюк В. С., Турбин А. Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. К.: Наук. думка, 1982. 236 с.
13. Корлат А. Н., Кузнецов В. Н., Новиков М. И., Турбин А. Ф. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания. Кишинев: Штиинца, 1991. 276 с.
14. Beichelt F., Franken P. Zuverlässigkeit und Instandhaltung, Mathematische Methoden. Berlin: VEB Verlag Technik, 1983. 392 s.
15. Райнике К., Ушаков И. А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.

Сведения об авторе

Алексей Иванович Песчанский — д-р техн. наук, профессор; Севастопольский государственный университет, кафедра высшей математики; E-mail: peschansky_sntu@mail.ru

Поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена после рецензирования 25.10.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* (Queuing Theory), Moscow, 1995, 529 p. (in Russ.)
2. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. *Vvedeniye v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* (Introduction to Queuing Theory), Moscow, 1987, 336 p. (in Russ.)
3. Klimov G.P. *Stokhasticheskiye sistemy obsluzhivaniya* (Stochastic Queuing Systems), Moscow, 1966, 244 p. (in Russ.)
4. Kovalenko I.N. *Itogi Nauki. Seriya "Teoriya Veroyatnostei. Matematicheskaya Statistika. Teoreticheskaya Kibernetika. 1970"*, Moscow, 1971, pp. 5–109. (in Russ.)
5. Matveev V.F., Ushakov V.G. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya* (Queuing Systems), Moscow, 1984, 240 p. (in Russ.)
6. Borovkov A.A. *Veroyatnostnyye protsessy v teorii massovogo obsluzhivaniya* (Probabilistic Processes in Queuing Theory), Moscow, 1971, 368 p. (in Russ.)
7. Ivchenko G.I., Kashtanov V.A., Kovalenko I.N. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* (Queuing theory), Moscow, 1982, 256 p. (in Russ.)
8. Peschansky A.I. *Appl. Mathematics*, 2011, no. 4(2), pp. 403–409, DOI: 10.4236/am.2011.24049.
9. Peschansky A.I. *Vestnik. SevNTU: Ser. Informatika, elektronika, svyaz'*, 2011, no. 114, pp. 47–52. (in Russ.)
10. Kendall D. *Ann. Math. Statistics*, 1953, no. 3(24), pp. 338–354.
11. Peschansky A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 9(66), pp. 715–730, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-715-730. (in Russ.)
12. Korolyuk V.S., Turbin A.F. *Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem* (Markov Recovery Processes in System Reliability Problems), Kyiv, 1982, 236 p.
13. Korlat A.N., Kuznetsov V.N., Novikov M.I., Turbin A.F. *Polumarkovskiye modeli vosstanavlivayemykh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya* (Semi-Markov Models of Recoverable Systems and Queuing Systems), Kishinev, 1991, 276 p. (in Russ.)
14. Beichelt F., Franken P. *Zuverlässigkeit und Instandhaltung, Mathematische Methoden*, Berlin, VEB Verlag Technik, 1983, 392 s.
15. Raynshke K., Ushakov I.A. *Otsenka nadezhnosti sistem s ispol'zovaniyem grafov* (Assessing the Reliability of Systems Using Graphs), Moscow, 1988, 208 p. (in Russ.)

Data on author

Alexey I. Peschansky — Dr. Sci., Professor; Sevastopol State University, Department of Higher Mathematics; E-mail: peschansky_sntu@mail.ru

Received 14.09.2023; approved after reviewing 25.10.2023; accepted for publication 17.12.2023.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 629.7.05.067: 629.7.054.44
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-145-152

ПОСТРОЕНИЕ, МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ФЮЗЕЛЯЖНЫМ ПРИЕМНИКОМ ПОТОКА

В. М. Солдаткин*, В. В. Солдаткин, Е. С. Ефремова, А. В. Никитин

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ,
Казань, Россия*

**w-soldatkin@mail.ru*

Аннотация. Отмечена необходимость измерения воздушных параметров движения самолетов и других летательных аппаратов (ЛА) для решения задач управления и обеспечения безопасности движения в пределах атмосферы. Рассмотрены особенности широко используемых систем измерения воздушных параметров с распределенными по фюзеляжу приемниками и датчиками параметров набегающего воздушного потока. Эти приемники и датчики пневмопроводами и электрическими кабелями соединены с бортовым вычислителем, формирующим выходные сигналы системы, что усложняет конструкцию, увеличивает массу и стоимость системы. Выступающие за обшивку фюзеляжа приемники и датчики нарушают аэродинамику ЛА, увеличивают заметность траектории его движения. Разрабатываемые системы измерения воздушных параметров на основе вихревого, ионно-меточного и ультразвукового методов контроля параметров набегающего потока, построенные на базе одного (интегрированного) многофункционального приемника потока, также не устраняют все указанные недостатки. Раскрыты принципы построения системы измерения воздушных параметров движения ЛА с интегрированным фюзеляжным приемником потока с встроенными преобразователями первичной информации и вычислителем системы. Получены аналитические модели первичных информативных сигналов, алгоритмов их обработки и формирования выходных сигналов системы. Рассмотрены конкурентные преимущества и область применения рассматриваемой системы.

Ключевые слова: воздушные параметры, измерение, система, построение, приемник, интегрированный, фюзеляжный, модели, сигналы, обработка, преимущества, применение

Ссылка для цитирования: Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Ефремова Е. С., Никитин А. В. Построение, модели формирования и обработки сигналов системы измерения воздушных параметров с интегрированным фюзеляжным приемником потока // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 145—152. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-145-152.

CONSTRUCTION, MODELING OF SIGNAL FORMATION AND PROCESSING FOR AIR PARAMETERS MEASURING SYSTEM WITH THE INTEGRATED FUSELAGE FLOW RECEIVER

V. M. Soldatkin*, V. V. Soldatkin, E. S. Efremova, A. V. Nikitin

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

Abstract. It is noted that measuring the air parameters of airplanes and other aircrafts movement is necessary for solving control problems and ensure safety of traffic within the atmosphere. The features of widely used systems for measuring air parameters with receivers and sensors of incoming air flow parameters distributed throughout the fuselage are considered. Pneumatic lines and electrical cables that connect these receivers and sensors to an on-board computer generating system output signals, complicate the design and increase the system weight and cost. Receivers and sensors protruding beyond the fuselage skin disrupt the aerodynamics of the aircraft and increase its trajectory visibility. The sys-

terms being developed for measuring air parameters using vortex, ion-tag and ultrasonic methods for monitoring the oncoming flow and built on the basis of one (integrated) multifunctional flow receiver, also do not eliminate all of these shortcomings. The principles of constructing a system for measuring the air parameters of an aircraft's movement with an integrated fuselage flow receiver with built-in primary information converters and a system computer are formulated. Analytical models of primary informative signals, algorithms for their processing and generation of system output signals are developed. The competitive advantages and scope of application of the system under consideration are discussed.

Keywords: air parameters, measurement, system, construction, receiver, integrated, fuselage, models, signals, processing, advantages, application

For citation: Soldatkin V. M., Soldatkin V. V., Efremova E. S., Nikitin A. V. Construction, modeling of signal formation and processing for air parameters measuring system with the integrated fuselage flow receiver. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 145—152 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-145-152.

Движение самолетов и других ЛА различного класса и назначения осуществляется в приземном возмущенном слое атмосферы, и для решения задач пилотирования, автоматического управления, предупреждения и предотвращения опасных режимов необходима достоверная информация об истинной воздушной скорости и аэродинамических углах атаки и скольжения, барометрической высоте и вертикальной скорости, приборной скорости и числе Маха, температуре, давлении и плотности воздуха на данной высоте полета [1—3].

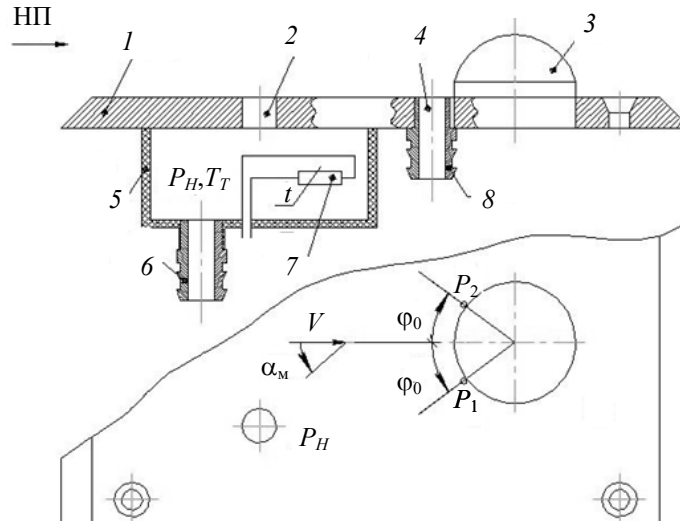
Для измерения указанных воздушных параметров движения ЛА относительно окружающей среды широко применяются измерительные системы, построенные на базе автономных приемников статического и полного воздушного давления, флюгерных или других датчиков аэродинамических углов, приемников температуры набегающего воздушного потока, вынесенных за обшивку фюзеляжа и связанных пневмопроводами и электрическими кабелями с бортовым вычислителем, который по заданным аналитическим моделям определяет и выдает выходные сигналы системы [4—6]. При этом значительное число распределенных по фюзеляжу автономных приемников и датчиков параметров набегающего воздушного потока, пневмопроводов и электрических кабелей является причиной усложнения конструкции, увеличения массы и стоимости таких систем измерения воздушных параметров движения ЛА. Вынесенные за обшивку фюзеляжа приемники и датчики параметров набегающего потока нарушают аэродинамику обтекания ЛА и увеличивают заметность траектории его движения. Все это ограничивает область применения таких традиционных систем измерения воздушных параметров на малоразмерных и сверхлегких самолетах, беспилотных и дистанционно пилотируемых ЛА различного назначения. При этом разрабатываемые системы измерения воздушных параметров движения ЛА, построенные на основе вихревого [7], ионно-меточного [4] и ультразвукового [8, 9] методов контроля параметров набегающего потока с помощью неподвижного многофункционального приемника, полностью не снимают указанные выше ограничения по применению.

Одним из направлений упрощения конструкции, снижения массы и стоимости, обеспечения скрытности траектории движения ЛА является построение системы измерения воздушных параметров движения на базе одного — интегрированного неподвижного невыступающего фюзеляжного потока с встроенными преобразователями и датчиками параметров набегающего приемника, и вычислителем — формирователем выходных сигналов системы.

В основу построения интегрированного фюзеляжного приемника потока положен широко используемый на самолетах плиточный (фюзеляжный) приемник статического давления [10, 11] с аэродинамическим компенсатором аэродинамической методической погрешности, обусловленной искажением контролируемого невозмущенного набегающего воздушного потока в месте расположения плиточного приемника статического давления при движении самолета и обтекании фюзеляжа.

На рисунке приведена конструктивная схема интегрированного фюзеляжного приемни-

ка потока рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения ЛА.



Интегрированный фюзеляжный приемник потока включает закрепляемую на фюзеляже плиту 1, на которой расположены отверстие 2 для восприятия статического давления P_H набегающего потока (НП) и аэродинамический компенсатор 3. Для получения информации о воздушных параметрах движения ЛА относительно окружающей среды вблизи аэродинамического компенсатора 3 симметрично оси фюзеляжного приемника под углом φ_0 расположены два отверстия 4 для восприятия давлений P_1 и P_2 . Ось фюзеляжного приемника при установке на ЛА располагается параллельно продольной оси ЛА, относительно которой отсчитывается измеряемый местный аэродинамический угол α_m , определяющий направление вектора V скорости набегающего потока в месте установки фюзеляжного приемника. Место расположения отверстия 2 для восприятия статического давления P_H относительно аэродинамического компенсатора 3 определяется из условия максимальной компенсации аэродинамической погрешности восприятия P_H по результатам летных испытаний интегрированного фюзеляжного приемника на конкретном типе ЛА и месте установки приемника на фюзеляже с использованием технологии, разработанной в Летно-исследовательском институте им. М. М. Громова [12].

Для устранения возможных пульсаций давления в месте расположения отверстия 2 на скользящей поверхности плиты 1 фюзеляжного приемника воспринимаемое давление поступает в камеру торможения 5. При сглаживании пульсаций статическое давление P_H через штуцер 6 поступает в канал преобразования и обработки системы. В камере торможения 5 расположен проводниковый терморезистор 7, регистрирующий температуру T_T торможения набегающего воздушного потока на данной высоте H . Сопротивление R_{T_T} терморезистора 7 и давления P_1 и P_2 , воспринимаемые на скользящей поверхности вблизи аэродинамического компенсатора 3, через штуцер 8 также поступают в канал преобразования и обработки.

Следовательно, первичными информативными параметрами системы измерения воздушных параметров движения с интегрированным фюзеляжным приемником являются давления P_H , P_1 и P_2 и температура T_T . По разработанным авторами и известным аналитическим моделям встроенный вычислитель определяет и формирует выходные сигналы системы.

В работе [4] приведены результаты исследования распределения давлений на скользящей поверхности вблизи полусферического и цилиндрического тел обтекания. Как показал анализ полученных результатов, для повышения чувствительности канала измерения местного аэродинамического угла α_m целесообразно аэродинамический компенсатор 3 выполнить в виде полусферы радиуса r_0 , установленной на цилиндрическом основании того же радиуса высотой порядка $(0,25—0,3)r_0$.

Тогда давления P_1 и P_2 , воспринимаемые вблизи такого аэродинамического компенса-

тора, будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned} P_1 - P_H &= \eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left[4 \cos^2(\varphi_0 - \alpha_m) - \eta - 2 \right] = \eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left[4 \left(1 - \sin^2(\varphi_0 - \alpha_m) \right) - \eta - 2 \right]; \\ P_2 - P_H &= \eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left[4 \cos^2(\varphi_0 + \alpha_m) - \eta - 2 \right] = \eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left[4 \left(1 - \sin^2(\varphi_0 + \alpha_m) \right) - \eta - 2 \right]; \end{aligned} \quad (1)$$

где $\eta = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$ — безразмерный конструктивный параметр, определяющий радиус r расположения отверстий для восприятия давлений P_1 и P_2 относительно поверхности аэродинамического компенсатора в виде полусферы с цилиндрическим основанием радиуса r_0 ; $\frac{\rho_H V^2}{2}$ — динамическое давление (скоростной напор) набегающего воздушного потока; $\varphi_0 - \alpha_m = \varphi_1$, $\varphi_0 + \alpha_m = \varphi_2$ — углы, определяющие текущие угловые положения φ_1 и φ_2 отверстий для восприятия давлений P_1 и P_2 относительно направления вектора $\mathbf{V}$ скорости набегающего воздушного потока; ρ_H — плотность воздуха на высоте H .

С учетом тригонометрических соотношений

$$\sin^2(\varphi_0 \mp \alpha_m) = \frac{1}{2} [1 - \cos 2(\varphi_0 \mp \alpha_m)],$$

$$\cos(2\varphi_0 \mp 2\alpha_m) = \cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m \pm \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m$$

полученные выражения (1) принимают вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 = P_1 - P_H &= 2\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left(\cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m + \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right); \\ \Delta P_2 = P_2 - P_H &= 2\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left(\cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m - \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

где ΔP_1 и ΔP_2 — информативные перепады давлений, воспринимаемых интегрированным фюзеляжным приемником потока.

Выражения (2) позволяют построить аналитические модели для определения местного угла атаки α_m и истинной воздушной скорости $V_{\text{и}} = V$. С этой целью получим выражения для разности $\Delta P_1 - \Delta P_2$ и суммы $\Delta P_1 + \Delta P_2$:

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\varphi_0 \sin 2\alpha_m; \quad (3)$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \left(\cos 2\varphi_0 \cos 2\alpha_m - \frac{\eta}{2} \right). \quad (4)$$

При выборе значения $\varphi_0 = 45^\circ$ угла расположения отверстий для восприятия давлений P_1 и P_2 найдем

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = 4\eta \frac{\rho_H V^2}{2} \sin 2\alpha_m; \quad (5)$$

$$|\Delta P_1 + \Delta P_2| = 2\eta^2 \frac{\rho_H V^2}{2}. \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) получим отношение вида

$$\frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{|\Delta P_1 + \Delta P_2|} = \frac{2}{\eta} \sin 2\alpha_m. \quad (7)$$

Тогда аналитическая модель для определения местного аэродинамического угла α_m в

измерительном канале системы измерения воздушных параметров движения ЛА с интегрированным фюзеляжным приемником будет иметь вид:

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\eta}{2} \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{|\Delta P_1 + \Delta P_2|} \right). \quad (8)$$

С учетом выражения для определения плотности ρ_H воздуха на высоте H вида [13]:

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H} \quad (9)$$

аналитическая модель для определения истинной воздушной скорости V_B в измерительном канале рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения ЛА с использованием выражения (3) будет иметь вид:

$$V_B = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0 T_H}{\eta^2 \rho_0 T_0 P_H}}, \quad (10)$$

где $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 288,15 \text{ К}$, $P_0 = 101\,325 \text{ Па}$ — плотность, абсолютная температура и давление воздушной среды на высоте $H = 0$ стандартной атмосферы*.

Температура T_H наружного воздуха на высоте H определяется по регистрируемой температуре T_T торможения набегающего воздушного потока по известной аналитической модели вида [5, 6]:

$$T_H = \frac{T_T}{1 + 0,2\xi M^2}, \quad (11)$$

где $\xi = 0,98—1,02$ — коэффициент торможения набегающего воздушного потока.

Аналогично, используя связь числа Маха M и истинной воздушной скорости V_B вида [14]:

$$M = \frac{V_B}{a_H} = \frac{V_B}{\sqrt{kgRT_H}}, \quad (12)$$

где a_H — скорость звука в воздухе на высоте H ; $k = 1,4$ — показатель адиабаты воздуха; $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; $R = 29,27125 \text{ м/К}$ — газовая постоянная, получим аналитическую модель для определения числа Маха в измерительных каналах системы измерения воздушных параметров движения ЛА с интегрированным фюзеляжным приемником:

$$M = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2| P_0}{\eta^2 kgR\rho_0 T_0 P_H}}. \quad (13)$$

Аналитическая модель для определения приборной скорости $V_{пр}$ в измерительных каналах системы измерения воздушных параметров движения ЛА с учетом связи истинной приборной скорости V_B и приборной скорости $V_{пр}$ вида [14]:

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho_0}} V_B = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_B \quad (14)$$

будет иметь вид

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{\eta^2 \rho_0}}. \quad (15)$$

По воспринимаемому на скользящей поверхности с аэродинамическим компенсатором статическому давлению P_H по известным аналитическим моделям [6] определяется барометрическая (абсолютная) высота H :

* ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Изд-во Стандартов. 1981. 179 с.

— при $2000 < H \leq 11\,000$ м

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right]; \quad (16)$$

— при $11\,000 \leq H < 15\,000$ м

$$H = H_{11} + RT_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H}; \quad (17)$$

$$V_y = \frac{dH}{dt} \approx \frac{1}{4\tau_0} [H(t_i) - H(t_i - 2\tau_0) + H(t_i - \tau_0) - H(t_i - 3\tau_0)], \quad (18)$$

где $\tau = 0,0065$ К/м — температурный градиент; $T_{11} = 216,65$ К; $P_{11} = 22632$ Па; t_i — текущие моменты вычисления V_y ; τ_0 — фиксированный интервал времени между вычислениями.

При необходимости в каналах системы измерения воздушных параметров можно определить скорость звука $a = \sqrt{kgRT_H}$ на высоте H .

Таким образом, только по первичным информативным параметрам P_H , P_1 и P_2 и T_T , воспринимаемым интегрированным фюзеляжным приемником потока, во встроенном вычислителе по полученным аналитическим моделям определяются и формируются все воздушные параметры движения ЛА относительно окружающей воздушной среды. Отсутствие вынесенных в набегающий воздушный поток приемников и датчиков первичной информации, использование встроенного вычислителя упрощает конструкцию, снижает массу и стоимость, не нарушает аэродинамику обтекания фюзеляжа, не увеличивает заметность траектории движения ЛА. Все это определяет конкурентные преимущества и расширяет возможные области применения рассматриваемой системы воздушных параметров движения относительно окружающей воздушной среды на малоразмерных и сверхлегких самолетах, на беспилотных и дистанционно пилотируемых летательных аппаратах различного класса и назначения. Полученные результаты являются научной основой для системотехнического и схемотехнического проектирования, исследования методических и инструментальных погрешностей измерительных каналов разрабатываемых вариантов системы измерения воздушных параметров с интегрированным фюзеляжным приемником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Г. А., Пуминова Г. С., Сильвестров П. В. Безопасность полетов в возмущенной атмосфере. М.: Транспорт, 1992. 272 с.
2. Макаров Н. Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: Теория, проектирование, применение / Под ред. д.т.н. В. М. Солдаткина. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.
3. Кравцов В. Г., Алексеев Н. В. Аэрометрия высотно-скоростных параметров летательных аппаратов // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. 2000. № 8. С. 47—50.
4. Солдаткин В. М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
5. Ключев Г. И., Макаров Н. Н., Солдаткин В. М., Ефимов И. П. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2005. 509 с.
6. Солдаткин В. М., Ганеев Ф. А., Солдаткин В. В., Никитин А. В. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 526 с.
7. Ефремова Е. С., Солдаткин В. М. Построение и погрешности системы воздушных сигналов на основе вихревого метода // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 749—755.

8. Ефремова Е. С., Никитин А. В., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Теоретические основы разработки и исследования электронного датчика параметров вектора ветра воздушной скорости малоразмерного летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 9. С. 774—781.
9. Ефремова Е. С., Мифтахов Б. И., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М. Методические погрешности электронного датчика параметров вектора воздушной скорости летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 457—463.
10. Пат. СССР 271140, МКИ G01P 5/12. Фюзеляжный приемник статического давления с аэродинамическим компенсатором / Б. И. Абрамов, В. А. Смольцов, М. И. Петрова. 1970. БИ № 17.
11. Пат. СССР 339815, МКИ G01P 5/12. Фюзеляжный приемник статического давления / Б. И. Абрамов. 1972. БИ № 17.
12. Харин Е. Г., Копылов И. А. Технология летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: МАИ-ПРИНТ, 2012. 360 с.
13. Залманзон Л. А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 247 с.
14. Браславский Д. А., Логунов С. С., Пельпор Д. С. Авиационные приборы и автоматы. М.: Машиностроение, 1970. 432 с.

Сведения об авторах

- | | |
|--|---|
| Владимир Михайлович Солдаткин | — д-р техн. наук, профессор; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; профессор; E-mail: w-soldatkin@mail.ru |
| Вячеслав Владимирович Солдаткин | — д-р техн. наук, профессор; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; профессор; E-mail: w-soldatkin@mail.ru |
| Елена Сергеевна Ефремова | — канд. техн. наук; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; доцент; E-mail: soldatkina1991@bk.ru |
| Александр Владимирович Никитин | — канд. техн. наук; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, кафедра электронного приборостроения и менеджмента качества; доцент; E-mail: nikitin.rf@mail.ru |

Поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Filatov G.A., Puminova G.S., Silvestrov P.V. *Bezopasnost' poletov v vozmushchennoy atmosfere* (Flight Safety in a Disturbed Atmosphere), Moscow, 1992, 272 p. (in Russ.)
2. Makarov N.N. *Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: Teoriya, proyektirovaniye, primeneniye* (Systems for Ensuring the Safety of the Functioning of the Onboard Ergatic Complex: Theory, Design, Application), Moscow, 2009, 760 p. (in Russ.)
3. Kravtsov V.G., Alekseev N.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2000, no. 8, pp. 47–50. (in Russ.)
4. Soldatkin V.M. *Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatel'nykh apparatov* (Methods and Means for Measuring the Aerodynamic Angles of Aircraft), Kazan, 2001, 448 p. (in Russ.)
5. Klyuev G.I., Makarov N.N., Soldatkin V.M., Efimov I.P. *Izmeriteli aerodinamicheskikh parametrov letatel'nykh apparatov* (Meters of Aerodynamic Parameters of Aircraft), Ulyanovsk, 2005, 509 p. (in Russ.)
6. Soldatkin V.M., Ganeev F.A., Soldatkin V.V., Nikitin A.V. *Aviatsionnyye pribory, izmeritel'no-vychislitel'nyye sistemy i komplekсы: Printsipy postroyeniya, algoritmy obrabotki informatsii, kharakteristiki i pogreshnosti* (Aviation Instruments, Measuring and Computing Systems and Complexes: Design Principles, Information Processing Algorithms, Characteristics and Errors), Kazan, 2014, 526 p. (in Russ.)
7. Efremova E.S., Soldatkin V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 8(63), pp. 749–755. (in Russ.)
8. Efremova E.S., Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 9(64), pp. 774–781. (in Russ.)
9. Efremova E.S., Miftakhov B.I., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 6(66), pp. 457–463. (in Russ.)

10. Patent SU 271140, G01P 5/12, *Fyuzelyazhnyy priyemnik staticheskogo davleniya s aerodinamicheskim kompensatorom* (Fuselage Static Pressure Receiver with an Aerodynamic Compensator), B.I. Abramov, V.A. Smoltsov, M.I. Petrova, Published 1970, Bulletin 17. (in Russ.)
11. Patent SU 339815, G01P 5/12, *Fyuzelyazhnyy priyemnik staticheskogo davleniya* (Fuselage Static Pressure Receiver), B.I. Abramov, Published 1972, Bulletin 17. (in Russ.)
12. Kharin E.G., Kopylov V.A. *Tekhnologii letnykh ispytaniy bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov s primeneniym kompleksa bortovykh trayektornykh izmereniy* (Technologies for Flight Tests of Onboard Equipment of Aircraft Using a Complex of On-Board Path Measurements), Moscow, 2012, 360 p. (in Russ.)
13. Zalmanzon L.A. *Protochnyye elementy pnevmaticheskikh priborov kontrolya i upravleniya* (Flow Elements of Pneumatic Monitoring and Control Devices), Moscow, 1961, 247 p. (in Russ.)
14. Braslavsky D.A., Logunov S.S., Pelpor D.S. *Aviatsionnyye pribory i avtomaty* (Aviation Instruments and Machines), Moscow, 1970, 432 p. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|--|
| Vladimir M. Soldatkin | — Dr. Sci., Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; Professor; E-mail: w-soldatkin@mail.ru |
| Vyacheslav V. Soldatkin | — Dr. Sci., Professor; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; Professor; E-mail: w-soldatkin@mail.ru |
| Elena S. Efremova | — PhD; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; Associate Professor; E-mail: soldatkina1991@bk.ru |
| Alexander V. Nikitin | — PhD; A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University, Department of Electronic Instrument Making and Quality Management; Associate Professor; E-mail: nikitin.rf@mail.ru |

Received 12.09.2023; approved after reviewing 16.10.2023; accepted for publication 17.12.2023.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

УДК 681.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-153-161

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБКИМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ УЧАСТКОМ

Дж. Ф. МАМЕДОВ*, З. М. МУРАДЛЫ, М. С. САЛМАНОВ

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан
*cavan62@mail.ru

Аннотация. На основе анализа традиционных этапов автоматизированного проектирования, особенно этапов эскизного и рабочего проектирования, определены основные проблемы, приводящие к недостаточно корректным инженерным, экспериментальным и программным решениям при разработке автоматизированной системы управления и контроля гибких производственных участков (ГПУ) в области машиностроения. На основе исходных данных технического задания процесса автоматизированного проектирования, его современного инструментария, а также требований и задач этапов проектирования предлагается структурная схема автоматизированного проектирования системы управления ГПУ с детальным представлением этих этапов. Согласно компоновочной схеме объекта исследования ГПУ резки и отжига в производстве алюминиевых испарителей для бытовых холодильников определены типы, функции информационно-измерительных средств и их позиционирование на активных элементах производственного участка. Для описания исходных данных позиционирования и геометрических данных датчиков, элементов контроля системы управления ГПУ в виде логических связей заданы координаты, а также математические условия позиционирования датчиков в трехмерной системе координат. Определяются характеристики функций информационно-измерительной и управляющей системы исследуемой ГПУ, их координаты в зависимости от расчетного и экспериментального положения активных элементов, маршрутов изготовления производственного изделия и схемы автоматизации. В трехмерной системе координат позиционирования информационно-измерительных элементов с учетом рабочих зон активных элементов ГПУ, сформированных в виде параллелепипедов и цилиндров, где некоторые рабочие зоны пересекаются, определены геометрические формы обобщенных рабочих зон всех активных элементов.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, система управления, гибкий производственный участок, эскизный и рабочий проекты, интерфейс программы

Ссылка для цитирования: Мамедов Дж. Ф., Мурадлы З. М., Салманов М. С. Инструментарий для эскизного проектирования на этапах разработки системы управления гибким производственным участком // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 153—161. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-153-161.

TOOLKIT FOR PRELIMINARY DESIGN AT THE STAGES OF DEVELOPING A CONTROL SYSTEM FOR A FLEXIBLE PRODUCTION AREA

J. F. Mammadov*, Z. M. Muradli, M. S. Salmanov

Sumgait State University, Sumgait, Republic of Azerbaijan
cavan62@mail.ru

Abstract. Based on analysis of the traditional stages of computer-aided design (CAD), especially at the stages of preliminary and detailed design, the main problems leading to insufficiently accurate engineering, experimental and software results in the development of an automated control and monitoring system for flexible production area (FPA) in the field of mechanical engineering are identified. Based on the initial data of the terms of reference for the computer-aided design process, its modern tools, as well as the requirements and tasks, standards for the design stages, especially the stages of preliminary and working design, a block diagram of the computer-aided design of the FPA control system with a

detailed presentation of these stages is proposed. According to the layout diagram of the object of study of FPA for cutting and annealing in the production of aluminum evaporators for domestic refrigerators, the types, functions and positioning of information and measuring tools on the active elements of the production site are determined. To describe the initial positioning data and geometric data of sensors, control elements of the FPA control system in the form of logical links, descriptive products, coordinates, and expressions in the form of mathematical conditions for positioning sensors in a 3-dimensional coordinate system are given. The characteristics of the functions of the information-measuring and control system of the studied FPA are determined, their coordinates are determined depending on the measurement and implementation of the positions of the active elements, the routes for manufacturing the production product and the automation scheme.

Keywords: design automation, control system, flexible production area, draft and working design, program interface

For citation: Mammadov J. F., Muradli Z. M., Salmanov M. S. Toolkit for preliminary design at the stages of developing a control system for a flexible production area. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 153—161 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-153-161.

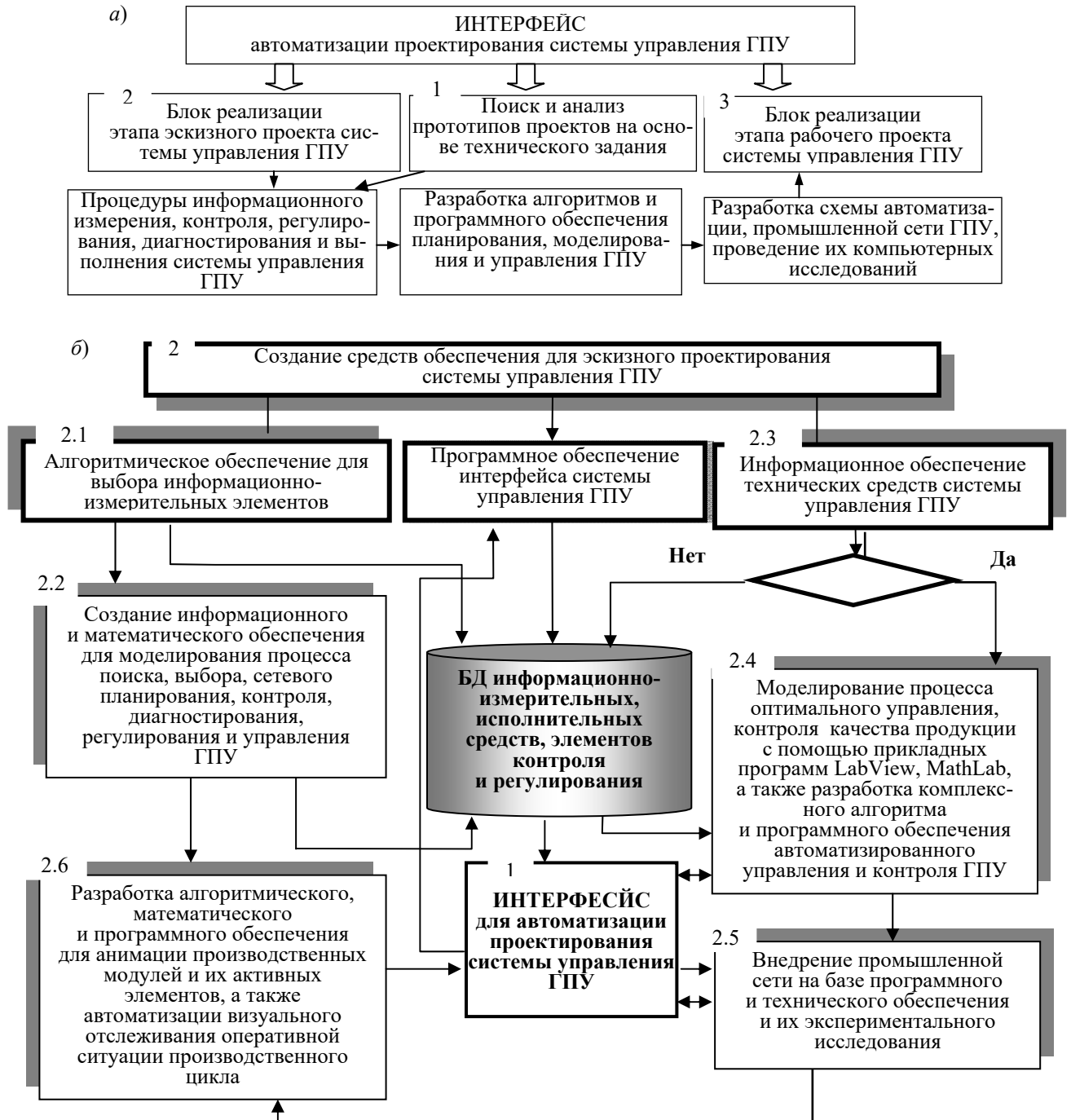
Как известно, выбор отдельных научно-исследовательских, инженерно-ориентированных технических предложений, разработка новых эскизных и рабочих проектов по автоматизации и управлению технологическими операциями гибких производственных участков (ГПУ), их монтажу и согласованию основного оборудования, автоматических логистических линий между производственными модулями — наиболее важные задачи автоматизированного проектирования системы управления и контроля ГПУ в целом [1, 2]. Поскольку ГПУ в области машиностроения является сложной технической системой и управление ее технологическими функциями требует масштабного технологического анализа, автоматического измерения, контроля, регулирования и т.д., необходимо исследовать этапы автоматизированного проектирования (АП) системы управления ГПУ и построить его автоматизированную схему.

Анализ традиционных этапов АП гибких производственных систем и их участков [3, 4] показывает, что творческая деятельность в большей степени наблюдается на стадиях эскизного и рабочего проектирования, поскольку за счет сбора экспертных знаний и их систематизации на стадиях автоматизации процесса проектирования системы управления ГПУ — особенно при создании схемы автоматизации, графической визуализации контроля технологической схемы производства, маршрутизации промышленной сети — можно достичь наилучших результатов. На этапах эскизного проектирования промышленных роботов, манипуляторов и оборудования, в условиях цифрового производства и перехода к интеллектуальным гибким производственным системам, особое место уделяется вопросам разработки программного инструментария для систем управления [2, 5]. Представляется целесообразным применение алгоритмического и программного обеспечения [2, 3] для оптимального управления гибкими производственными системами при определении основных проектных задач моделирования, формирования полноценной базы знаний информационного обеспечения эскизного и рабочего этапов автоматизированного проектирования ГПУ [2].

Эскизный и рабочий проекты системы управления ГПУ с отработкой, оценкой их эффективности исходя из конструктивных размеров активных элементов и ее производственных площадей, позиций их размещения, типов технологического оборудования и логистических линий, контроль качества выпускаемой продукции и определение требований зависят от гибкости программы управления, комплексной автоматизации технологического процесса и подготовки проектной документации [5, 6].

В соответствии с техническим заданием процесса автоматизированного проектирования, установленными требованиями и задачами, нормативами этапов проектирования (особенно эскизного и рабочего) предлагается структурная схема автоматизированного проектирования системы управления ГПУ (рис. 1). Автоматизация процессов эскизного и рабочего проектирования системы управления ГПУ выполняется на основе технического, программного, информационного, математического, лингвистического, организационного и методического обеспечения САПР [7—9].

Первоначально определим функции централизованного интерфейса автоматизации процесса проектирования системы управления исследуемой ГПУ. В функциях управления ГПУ поэтапно решаются исходные проектные задачи с учетом выбора информационно-измерительного, регулируемого, исполнительного, контролируемого и диагностического элементов. На рис. 1 проиллюстрировано блочное представление этапов эскизного и рабочего проектирования, обеспечивающих автоматизацию проектных операций системы управления ГПУ (на примере производственного участка резки и отжига алюминиевых испарителей). На основе программного интерфейса с введением технического задания проекта поэтапно реализуются процедуры эскизного проектирования и операции этапа рабочего проектирования. Таким образом, этапы проектирования системы управления ГПУ — эскизные и рабочие проектные процедуры и их операции — рассматриваются как основные подпрограммы централизованного программного интерфейса.



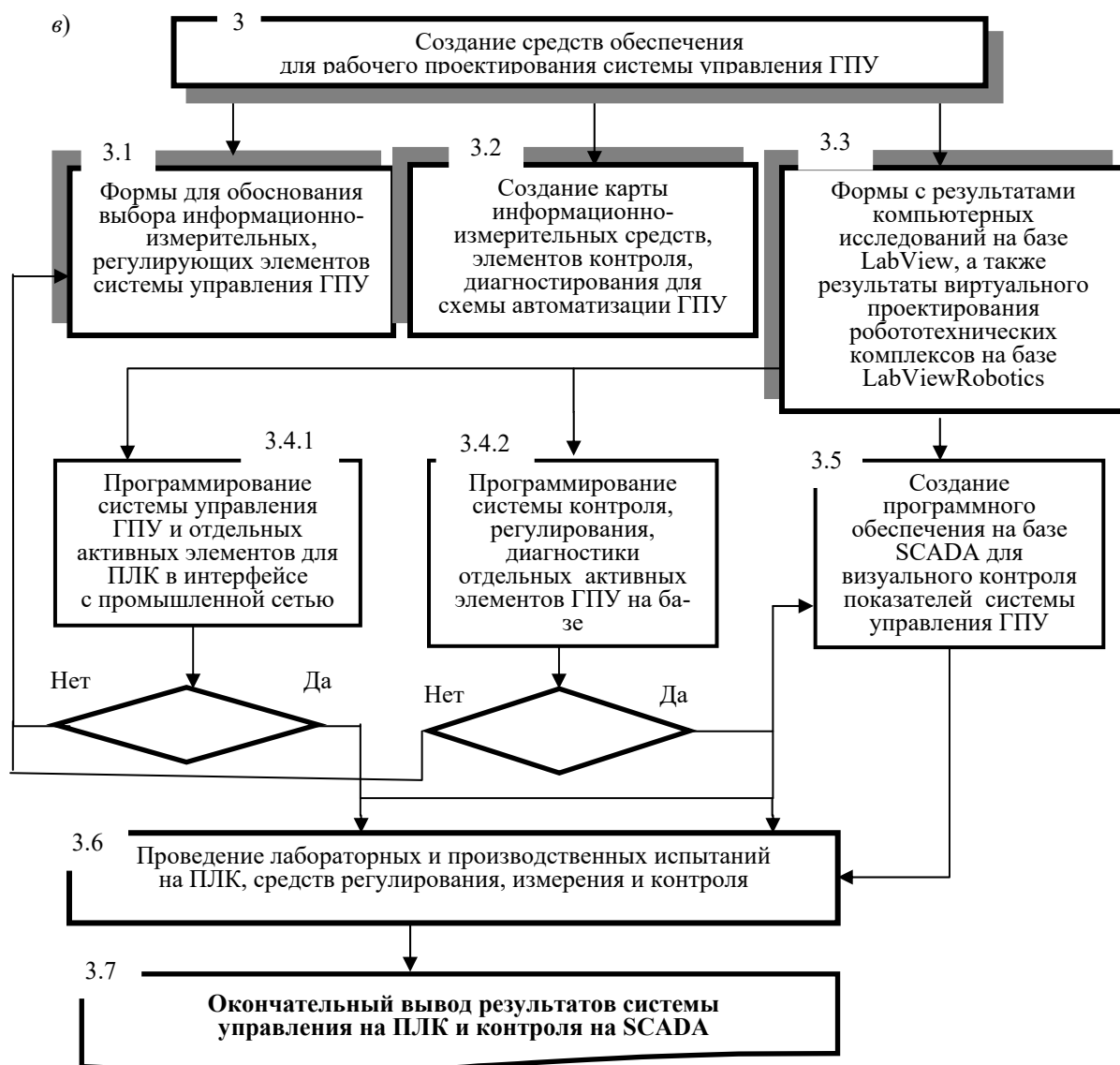


Рис. 1

После активизации интерфейса в техническое задание проекта вводятся область применения ГПУ, структурная схема исследуемого производства, уровни автоматизированной системы управления, технические данные активных элементов ГПУ, производственные модули, их рабочие зоны и т.д. Согласно компоновочной схеме объекта исследования ГПУ резки и отжига алюминиевых испарителей (рис. 2), его активных элементов — станка раскрытия алюминиевого рулона (СРАР), гильотинных станков (ГС1 и ГС2), подвесного краноманипулятора (ПКМ), промышленного робота (ПР), автоматической транспортной системы (АТС), печи отжига (ПО) — определяются информационно-измерительные элементы (ИИЭ) и их позиции [10].

Исходные данные позиционирования и геометрические данные датчиков, элементов контроля системы управления (СТЗ) ГПУ задаются следующим образом.

1. Параметры рабочих зон активных элементов ГПУ:

1.1 длина $U_i = z[s_u, x_i]$; ширина $E_i = z[s_e, x_i]$; высота $H_i = z[s_h, x_i]$,

где U_i , E_i , H_i — геометрические показатели активных элементов; x_i — тип активного элемента.

2. Параметры позиционирования активного элемента x_i :

2.1 по оси $X_{x,i} = z[s_x, x_i]$; вдоль оси $Y_{y,i} = z[s_y, x_i]$;

2.2 по оси $Z_{z,i} = z[s_z, x_i]$; угол $\alpha_i = z[s_\alpha, x_i]$.

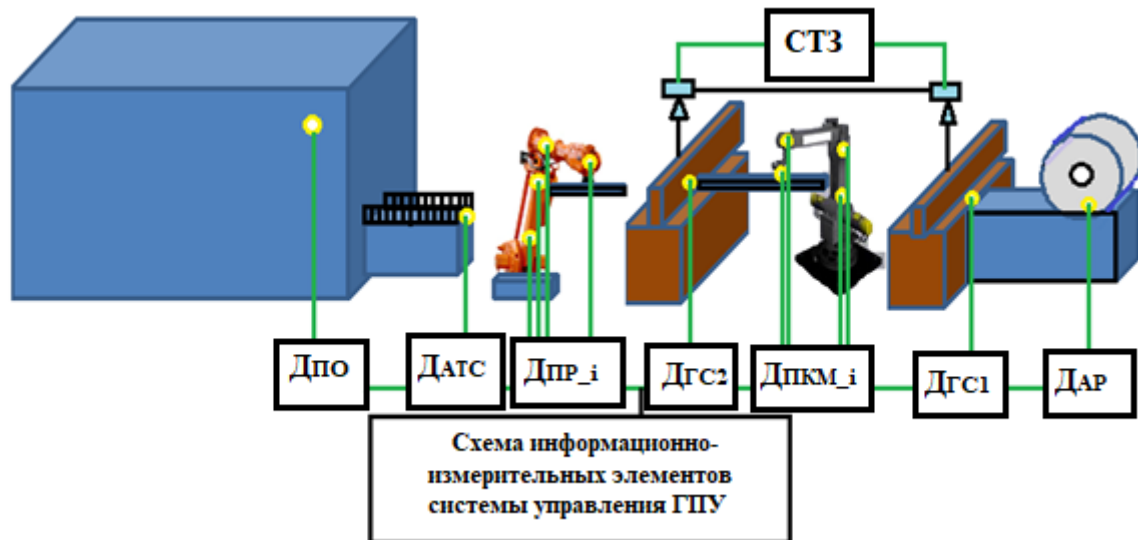


Рис. 2

Согласно рис 2, для определения параметров позиционирования датчиков, устройств контроля и управления по компоновочной структуре ГПУ их можно представить в виде позиций датчиков ДАР, ДГс1, ДГс2, ДПКМ_i, ДПР_i, Дат, ДПО и системы технического зрения (СТЗ) для контроля размеров и качества алюминиевых листов. В этом случае набор позиций аппроксимируется соответствующими активными элементами в виде гильотинных станков и печи отжига с геометрической формой параллелепипеда P_i^x , совместной рабочей зоны цилиндра S_i^x и параллелепипеда P_i^x для подвешенного крана-манипулятора и промышленного робота, станка для раскрытия рулона. Учитывая множество форм параллелепипеда P_i^x и рабочих зон цилиндра S_i^x , можно записать следующие логические отношения.

— Для рабочих зон гильотинных станков, автоматического транспортера и печи отжига в виде прямоугольного параллелепипеда

$$P_i^x = \{x_i, y_i, z_i\}, \text{ if } \begin{cases} x_i - \frac{1}{2U_i} \leq x_i \leq x_i + \frac{1}{2U_i}; \\ y_i - \frac{1}{2E_i} \leq y_i \leq y_i + \frac{1}{2E_i}; \\ z_i - \frac{1}{2H_i} \leq z_i \leq z_i + \frac{1}{2H_i}. \end{cases} \quad (1)$$

— Рабочие зоны подвешенного крана-манипулятора, промышленного робота, станка для раскрытия алюминиевого рулона с прямоугольным параллелепипедом и цилиндрическими рабочими зонами

$$P_i^x = \{x_i, y_i, z_i, \alpha_i\}, \text{ if } \begin{cases} x_i - \frac{1}{2U_i} \leq x_i \leq x_i + \frac{1}{2U_i}; \\ y_i - \frac{1}{2E_i} \leq y_i \leq y_i + \frac{1}{2E_i}; \\ z_i - \frac{1}{2H_i} \leq z_i \leq z_i + \frac{1}{2H_i}; \\ \alpha_i - \frac{1}{4}ALFA_i \leq \alpha_i \leq \alpha_i + \frac{1}{4}ALFA_i. \end{cases} \quad (2)$$

В соответствии с геометрическими формами рабочих зон активных элементов ГПУ (рис. 3, а — схема позиционирования по прямоугольным траекториям ПКМ; б — по ци-

линдрической траектории ПР) M_i определяется как совокупность точек позиционирования средств технологического измерения, контроля и диагностики.

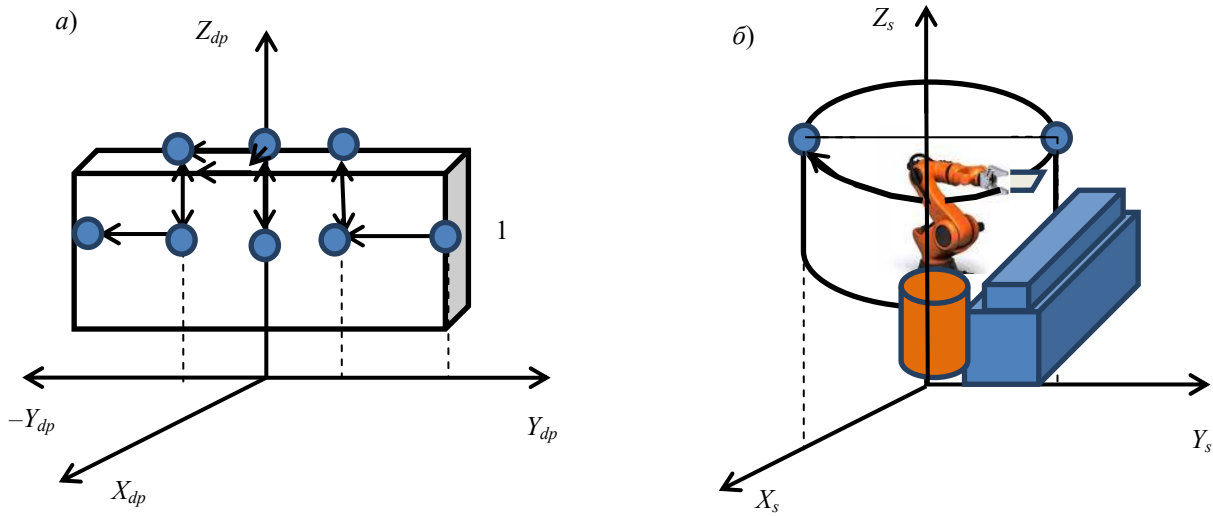


Рис. 3

Прямоугольные параллелепипеды формируются на основе рабочих траекторий ПКМ, ПР, ГМ1 и ГМ2, алюминиевого рулона (АР), АТ и ПО. В этом случае геометрическая форма прямоугольного параллелепипеда позиционирования для каждого активного элемента ГПУ определяется как множество позиций вершин:

$$P_i = \{X_i, Y_i, Z_i, \alpha_i\}, \text{ if } \begin{cases} X_{dp} - \Delta X_{dp} \leq X_{dp} \leq X_{dp} + \Delta X_{dp}; \\ Y_{dp} - 4\Delta Y_{dp} \leq Y_{dp} \leq Y_{dp} + 4\Delta Y_{dp}; \\ Z_{dp} - 6\Delta Z_{dp} \leq Z_{dp} \leq Z_{dp} + 6\Delta Z_{dp}, \end{cases} \quad (3)$$

где ΔX_{dp} , ΔY_{dp} , ΔZ_{dp} — перемещения по осям X , Y и Z .

Цилиндрическая рабочая зона формируется на основе рабочих траекторий ПКМ и ПР. В этом случае выражение записывается в виде:

$$S_i = \{X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha, \alpha_i\}, \text{ if } \begin{cases} X_\alpha - \frac{\pi}{2} \leq X_\alpha \leq X_\alpha + \frac{\pi}{2}; \\ Y_\alpha - \frac{\pi}{2} \leq Y_\alpha \leq Y_\alpha + \frac{\pi}{2}; \\ Z_h - \Delta Z_h \leq Z_h \leq Z_h + X_h. \end{cases} \quad (4)$$

Для определения пространственных точек угловых и направленных линейных перемещений ПР и ПКМ по оси Z используется следующая запись:

$$F_1 = \{<X_{\alpha_i}, Y_{\alpha_i}, Z_{h_i}>\}, \quad (5)$$

где $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$, N_h , $i = 1, N_{h,i}$ (N — количество перемещений).

По этому принципу определяются координаты цилиндрических рабочих зон ПР и ПКМ. Также определяются характеристики информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) исследуемой ГПУ:

- 1) их координаты в зависимости от положения активных элементов ГПУ;
- 2) маршрут производственного изделия (алюминиевого испарителя) в зависимости от ИИУС ГПУ;
- 3) схема автоматизации с беспроводной SCADA путем построения промышленной сети в зависимости от ИИУС ГПУ.

Учитывая, что в определенных случаях рабочие зоны активных элементов ГПУ, сформированные в виде параллелепипедов и цилиндров, пересекаются, рассмотрим особенности объединения активных элементов ГПУ с обобщенными рабочими зонами. В связи с этим задается геометрическая форма обобщенных рабочих зон всех активных элементов ГПУ и соответственно определяются их координаты. Таким образом, формируется совместная рабочая зона (рис. 4) в трехмерной системе координат позиционирования информационно-измерительных элементов АР, ГС1, ПКМ, ГС2, ПР, АТ и ПО.

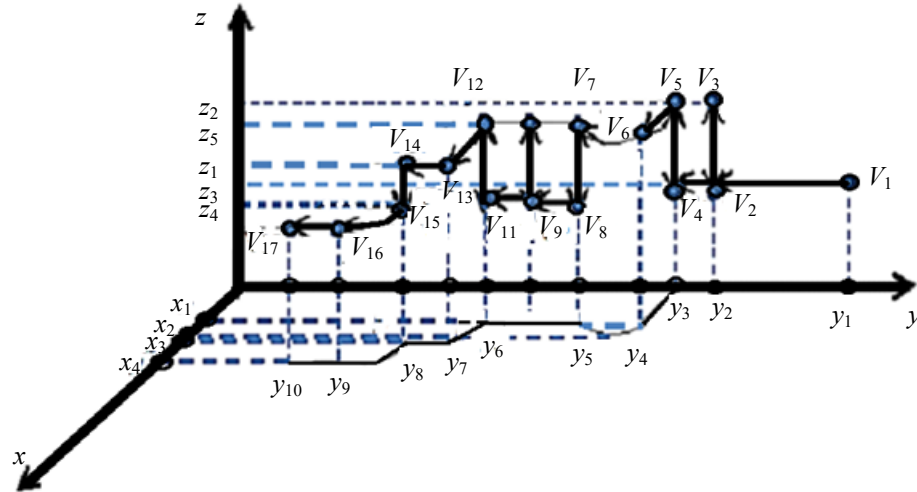


Рис. 4

Здесь на основе координат датчиков V_i активных элементов ГПУ определяются зоны их позиционирования Z_i и соответственно число сигналов, поступающих на вход программируемого логического контроллера (ПЛК), по следующему алгоритму:

Z_1 (АР и ГС1)=[$V_1(0, y_1, z_1)$; $V_2(0, y_2, z_1)$; $V_3(0, y_2, z_2)$; $V_2(0, y_2, z_1)$; $V_4(0, y_3, z_1)$] → „раскрытие АР на станке (S_{11}); фиксирование рулонного листа на месте позиционирования ГС1 (S_{12}); движение вниз гильотины ГС1 и резка алюминиевого листа (S_{13}); движение гильотины вверх ГС1 (S_{14}); позиционирование готового алюминиевого листа, вырезанного в ГС1 (S_{15})“.

Представим условие в следующей форме:

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{если выполнена технологическая операция;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

тогда в рабочей зоне АР и ГС1 число измерений технологических операций составит

$$N_{\text{АР, ГС1_vi}} = \sum_i^5 s_{1i} = 5.$$

Этот принцип применяется при измерении технологических операций для всех рабочих зон активных элементов ГПУ.

Для первой рабочей зоны информационного взаимодействия ГС1, ПКМ, обслуживающего станок раскрытия алюминиевого рулона и ГС1, с помощью предикатов позиционирования датчиков (V_i) в трехмерной системе координат представим:

Z_2 (ГС1 и ПКМ и ГС2)=[$V_5(0, y_3, z_2)$; $V_4(0, y_3, z_1)$; $\neg V_5(0, y_3, z_1)$; $V_5(x_1, 0, z_1)$; $V_6(0, y_4, z_5)$; $V_7(0, y_4, z_3)$; $V_8(0, y_5, z_3)$; $V_9(0, y_5, z_3)$] → „движение подвешенного крана-манипулятора вниз (S_{21}); захват отрезанного алюминиевого листа, расположенного на ГС1, с помощью захватного устройства ПКМ (S_{22}); прямолинейное движение вверх ПКМ (S_{23}); прямолинейное движение ПКМ вперед параллельно оси абсцисс (S_{24}); угловое перемещение ПКМ на 90° (S_{25}); прямолинейное движение ПКМ вниз (S_{26}); прямолинейное движение ПКМ (S_{27}); позиционирование алюминиевого листа на ГС2 (S_{28})“.

Количество технологических операции в рабочей зоне ПКМ и ГС2 будет определено в

виде $N_{ГС1, ПКМ, ГС2_vi} = \sum_i^8 s_{2i} = 8$.

Рабочую зону информационного взаимодействия гильотинного станка (ГС2), промышленного робота (ПР), обслуживающего ГС2 и автоматическую транспортную систему (АТС) печи отжига (ПО), можно описать с помощью предикатов позиций датчиков (V_{1i}) в трехмерной системе координат:

$Z_3(ГС2 \& ПР \& ПО) = [V_{10}(0, y_5, z_5); V_{11}(0, y_5, z_3); V_{11}(0, y_6, z_5); V_{11}(0, y_6, z_3); V_{12}(0, y_6, z_5); V_{12}(x_2, 0, z_1); V_{13}(0, y_7, z_1); V_{14}(0, y_8, z_3); V_{15}(0, y_8, z_3); V_{16}(x_3, 0, z_3); V_{17}(x_4, y_9, z_3); V_{16}(x_4, y_{10}, z_3)] \rightarrow$ „прямолнейное движение ПКМ вниз на позицию рабочей зоны ГС2 (p_{31}); резка алюминиевого листа с помощью гильотины ГС2 (p_{32}); позиционирование отрезанного алюминиевого листа в ГС2 (p_{33}); прямолнейное движение ПР вниз (p_{34}); захват алюминиевого листа, расположенного на ГС2 с помощью захватного устройства ПР (p_{35}); прямолнейное движение руки ПР (p_{36}); прямолнейное линейное движение руки ПР вперед (p_{37}); прямолнейное движение руки ПР (p_{38}); прямолнейное движение руки ПР вниз (p_{39}); угловое перемещение руки ПР на 90° (p_{310}); прямолнейное движение руки ПР (p_{311}); размещение и позиционирование прямоугольного алюминиевого листа на автоматическом конвейере печи отжига с помощью захватного устройства ПР (p_{312})“.

Число технологических операций в рабочей зоне ПКМ, ГС2, АТС и ПО определяется как $N_{ГС1, ПКМ, ГС2_vi} = \sum_i^{12} s_{3i} = 12$.

Для определения общих параметров входных-выходных связей данных измерения по технологическим операциям активных элементов исследуемой ГПУ необходимо использовать следующее выражение:

$$N = \sum_{i=1}^6 M_{ij} + \sum_{j=1}^6 M_{ij}. \quad (7)$$

Детальное представление структурной схемы автоматизированного проектирования системы управления ГПУ позволяет наиболее эффективно решать проектные задачи. Полученные алгоритмическое обеспечение и графическое представление схемы позиционирования информационно-измерительных элементов системы управления и контроля ГПУ позволяют более эффективно построить схему автоматизации, особенно на уровне информационно-измерительного обеспечения системы управления производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hunde B. R., Woldeyohannes A. D. Future prospects of computer-aided design – A review from the perspective of artificial intelligence, extended reality, and 3D printing // Results in Engineering. 2022. Vol. 14, N 3. P. 456—462.
2. Gembarski P. C. Three ways of integrating computer-aided design and knowledge-based engineering // Proc. of the Design Society: DESIGN Conf. 2020, May. Vol. 1. P. 1255—1264.
3. Talavage J. Flexible Manufacturing Systems in Practice: Design: Analysis and Simulation. CRC Press, 1987. 272 p.
4. Mammadov J. F., Abdullayev G. S., Aliyev I. R., Safarova T. A. Developing a flexible manufacture cell in the industrial park of the university and its modeling // Intern. Russian Automation Conf. Sochi, 8—14 September 2019. P. 22—27.
5. Hashimov A. M., Guliyev H. B., Babayeva A. R. Method and algorithm of control of shunt reactors of high-voltage power network in maintenance modes based on fuzzy logic theory // 6th Intern. Conf. on Modern Electric Power Systems (MEPS 2019). Wroclaw, Poland, 9—12 September 2019.
6. Wynn D. C., Clarkson P. J. Process models in design and development // Research in Engineering Design. 2018. Vol. 29. P. 161—202.

7. Diaz C., Jenny L., and Ocampo-Martinez C. Optimal production planning for flexible manufacturing systems: an energy-based approach // *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53, N 2. P. 10461—10467.
8. Рагимов Ш. Р., Мамедов Дж. Ф. Экспериментальное исследование процесса управления активных элементов гибких производственных систем в условиях неопределенности // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2022. Т. 20, № 2. С. 148—160.
9. Verma S., Sharma R., Deb S., Maitra D. Artificial intelligence in marketing: Systematic review and future research direction // *Intern. J. of Information Management Data Insights*. 2021. P. 1254—1273.
10. Huang Ch.-M., Kucinic A., Johnson J. A., Su H.-J., & Castro C. E. Integrated computer-aided engineering and design for DNA assemblies // *Nature materials*. 2021. N 20. P. 1264—1271.

Сведения об авторах

- Джаванишир Фирудин оглу Мамедов** — д-р техн. наук, профессор; Сумгаитский государственный университет, кафедра автоматизации и управления; заведующий кафедрой; E-mail: cavan62@mail.ru
- Зияда Махал кызы Мурадли** — докторант; Сумгаитский государственный университет, кафедра автоматизации и управления; E-mail: cavan62@mail.ru
- Матлаб Сулейман оглу Салманов** — Сумгаитский государственный университет, кафедра автоматизации и управления; старший преподаватель; E-mail: cavan62@mail.ru

Поступила в редакцию 03.06.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Hunde B.R., Woldeyohannes A.D. *Results in Engineering*, 2022, no. 3(14), pp. 456–462.
2. Gembarski P.C. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 2020, vol. 1, pp. 1255–1264.
3. Talavage J. *Flexible Manufacturing Systems in Practice: Design: Analysis and Simulation*, CRC Press, 1987, 272 p.
4. Mammadov J.F., Abdullayev G.S., Aliyev İ.R., Safarova T.A. *International Russian Automation Conference*, Sochi, Scopus, 8–14 September, 2019, p. 22–27.
5. Hashimov A.M., Guliyev H.B., Babayeva A.R. *6th International Conference on Modern Electric Power Systems (MEPS 2019)*, Wroclaw, Poland, 9–12 September 2019.
6. Wynn D.C., Clarkson P.J. *Research in Engineering Design*, 2018, vol. 29, pp. 161–202.
7. Diaz C., Jenny L., and Ocampo-Martinez C. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, no. 2(53), pp. 10461–10467.
8. Ragimov Sh.R., Mamedov D.F. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2022, no. 2(20), pp. 148–160. (in Russ.)
9. Verma S., Sharma R., Deb S., Maitra D. *Journal of Information Management Data Insights*, 2021, pp. 1254–1273.
10. Huang Ch.-M., Kucinic A., Johnson J.A., Su H.-J., & Castro C.E. *Nature materials*, 2021, no. 20, pp. 1264–1271.

Data on authors

- Javanshir F. Mammadov** — Dr. Sci., Professor; Sumgait State University, Department of Automation and Control; Head of the Department; E-mail: cavan62@mail.ru
- Ziyada M. Muradli** — Doctoral Student; Sumgait State University, Department of Automation and Control; E-mail: cavan62@mail.ru
- Matlab S. Salmanov** — Sumgait State University, Department of Automation and Control; Senior Lecturer; E-mail: cavan62@mail.ru

Received 03.06.2023; approved after reviewing 16.10.2023; accepted for publication 17.12.2023.

ПРИБОРЫ НАВИГАЦИИ

NAVIGATIONAL INSTRUMENTS

УДК 621.396
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-162-170

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПЕРЕБОРНОГО АЛГОРИТМА РАЗРЕШЕНИЯ ЦЕЛОЧИСЛЕННОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО АБСОЛЮТНОГО МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ

В. С. БАХОЛДИН*, Д. А. ЛЕКОНЦЕВ

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

Аннотация. Применение фазовых измерений в навигационной аппаратуре потребителя стало основным способом повышения точности навигационных определений. Используемые методы разрешения неоднозначности фазовых измерений требуют дополнительной информации и обладают рядом известных недостатков. Выявлены ограничения при реализации методов синтезированной длины волны и некрatных шкал для разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС. Предложен беспереборный метод разрешения неоднозначности фазовых измерений в спутниковой радионавигационной системе, не требующий избыточного числа измерений. Проведено теоретическое обоснование вычислительных процедур метода некрatных шкал. Предложенный метод использует математическую теорию чисел для определения целого числа фазовых циклов. Разработаны алгоритмы, реализующие данный метод на двух несущих частотах, представлены результаты экспериментальной обработки фазовых измерений псевдодальности в системе ГЛОНАСС. Эти алгоритмы могут быть использованы как при решении задачи местоположения в режиме позиционирования с прецизионной точностью, так и при определении ориентации высокoдинамичных объектов в реальном масштабе времени. На основе рассмотренного метода некрatных шкал могут быть разработаны алгоритмы разрешения неоднозначности фазовых измерений, полученных с помощью зарубежных спутниковых навигационных системах GPS, Galileo, Beidou.

Ключевые слова: разрешение неоднозначности, радионавигационная система, беспереборный метод, фазовые измерения, высокоточное определение местоположения, precise point positioning

Ссылка для цитирования: Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Результаты экспериментальной обработки фазовых измерений системы ГЛОНАСС с использованием бесперебойного алгоритма разрешения целочисленной неоднозначности для высокоточного абсолютного местоположения // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 162—170. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-162-170.

RESULTS OF EXPERIMENTAL PROCESSING OF PHASE MEASUREMENTS OF THE GLONASS SYSTEM USING A NON-BRUTE FORCE INTEGER AMBIGUITY RESOLUTION ALGORITHM FOR HIGH-PRECISION ABSOLUTE LOCATION

V. S. Bakholdin*, D. A. Lekontsev

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

Abstract. The use of phase measurements in consumer navigation equipment has become the main way to increase the accuracy of navigation determinations. The methods used to resolve the ambiguity of phase measurements require additional information and have a number of known disadvantages. Limitations are identified in the implementation of methods of synthesized wavelength and non-multiple scales for resolving the phase measurements ambiguity in the

GLONASS system at the present time. A non-brute force method for resolving the ambiguity of phase measurements in a satellite radio navigation system is proposed, which does not require an excessive number of measurements. A theoretical substantiation of the computational procedures of the multiple scale method are carried out. The proposed method uses mathematical number theory to calculate an integer number of phase cycles. Algorithms are developed to implement this method at two carrier frequencies, and the results of experimental processing of phase measurements of pseudo-range in the GLONASS system are presented. These algorithms can be used both when solving the positioning problem in precision-accuracy positioning mode, and when determining highly dynamic objects orientation of in real time. Based on the considered method of non-multiple scales, algorithms for resolving the ambiguity of phase measurements obtained using foreign satellite navigation systems GPS, Galileo, Beidou can be developed.

Keywords: ambiguity resolution, radio navigation system, non-brute force method, phase measurements, high precision absolute positioning, precise point positioning

For citation: Bakholdin V. S., Lekontsev D. A. Results of experimental processing of phase measurements of the GLONASS system using a non-brute force integer ambiguity resolution algorithm for high-precision absolute location. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 162—170 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-162-170.

Введение. Высокоточное определение местоположения в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) широко применяется при строительстве и геодезических работах, геодинамическом контроле лавиноопасных участков и движения тектонических плит, определении границ земельных участков, природных ресурсов и урожая при проведении кадастрового учета, навигационном обеспечении низкоорбитальных космических аппаратов и ионосферном мониторинге. После того как предельная точность кодовых измерений была исчерпана, в ГНСС стал широко применяться метод высокоточного абсолютного позиционирования (*precise point positioning*, PPP) с использованием фазовых измерений (ФИ). Погрешности навигационных определений в режиме постобработки не превышают 1 см для неподвижной навигационной аппаратуры потребителя (НАП) и единиц дециметров — для подвижной. Наиболее часто используется режим *Float PPP* (плавающее решение), при котором целочисленные неоднозначности ФИ включают немоделируемые аппаратные задержки и оцениваются действительными числами. Режим *Float PPP* обладает недостаточной оперативностью, и в зависимости от требуемой точности и объема полученных измерений поиск решения навигационной задачи может длиться несколько часов.

Использование результатов целочисленного разрешения неоднозначности (РН) ФИ позволяет сократить время решения навигационной задачи и перейти к позиционированию в режиме реального времени. Таким образом, разработка методов РН ФИ для высокоточного позиционирования в абсолютном режиме является актуальной задачей.

Для выполнения процедуры целочисленного РН ФИ при высокоточном позиционировании тем или иным способом [1—7] используют режим, называемый *Integer PPP* (PPP-AR (*ambiguity resolution*)), или фиксированное решение (*fixed solution*). Высокоточное определение местоположения реализуется с использованием корректирующей информации, сформированной ассистирующей системой в результате обработки большого числа измерений, выполняемых сетью наземных станций. В этом случае режимы *Float PPP* и *Integer PPP* не являются автономными, так как используют дополнительные данные от ассистирующих систем.

Неоднозначность измерений порождается, прежде всего, неопределенным начальным значением целого числа фазовых циклов (ФЦ). Проблемы обработки ФИ в ГНСС также увеличиваются при появлении на интервале их измерения „срывов“ слежения за фазами несущих колебаний навигационных сигналов, которые описываются в модели фазовых измерений изменением целого числа ФЦ на неизвестную величину. Обработка ФИ должна учитывать как их неоднозначность, так и возможное скачкообразное изменение их целого числа. Учет неоднозначности целого числа ФЦ в математической модели ФИ сводится к включению числа циклов в состав оцениваемых параметров. Для определения наличия скачков (слипов) в измерениях фазы навигационного сигнала разработаны методы, основанные на применении

линейных комбинаций кодовых и фазовых измерений (кодowo-фазовая безгеометрическая комбинация, кодовая и фазовая безгеометрические комбинации, комбинация Мельбурна—Вуббена) [8, 9]. Их использование позволяет определить наличие скачков в ФИ как на одной, так и на двух частотах. Сдерживающим фактором при РН ФИ в НАП является наличие смещений начальной фазы несущей частоты (НЧ), излучаемой спутником орбитальной группировки, а также фазовой задержки этого колебания в аппаратуре навигационного приемника.

Результативность математических моделей ФИ определяется степенью учета различных влияющих факторов [10]. Применительно к ФИ на НЧ ГНСС данные модели в упрощенном виде могут быть представлены следующим математическим выражением:

$$\varphi(t) = \frac{R(t)}{\lambda} + f(\Delta T(t_{\text{НАП}}) - \Delta T(t_{\text{НКА}})) + \Psi_{0\text{НКА}} + \Psi_{\text{прдНКА}} + \Psi_{0\text{НАП}} + \Psi_{\text{прмНАП}} + \Psi_{\text{троп}} + \\ + \Psi_{\text{ион}} + \Psi_{\text{мл}} + \Psi_{\text{шум}} + N,$$

где $R(t)$ — расстояние между фазовыми центрами антенн навигационного космического аппарата (НКА) и навигационной аппаратуры потребителя в момент времени t ; f — НЧ сигнала, излучаемого НКА; λ — длина волны НЧ НКА; $\Delta T(t_{\text{НАП}})$ и $\Delta T(t_{\text{НКА}})$ — смещение шкалы времени НАП и НКА относительно системной шкалы времени ГНСС на моменты времени излучения и приема сигнала; $\Psi_{0\text{НКА}}$ и $\Psi_{0\text{НАП}}$ — начальные фазы НЧ НКА и опорного генератора НАП; $\Psi_{\text{прдНКА}}$ — фазовая задержка в бортовом источнике навигационного сигнала и передающем радиотракте, учитывающая положение фазового центра антенны соответствующей радиоволны, $\Psi_{\text{прмНАП}}$ — фазовая задержка в приемном радиотракте НАП, $\Psi_{\text{троп}}$ и $\Psi_{\text{ион}}$ — фазовые искажения, вызываемые влиянием тропосферы и ионосферы; $\Psi_{\text{мл}}$ — погрешности, вызванные многолучевым распространением сигналов; $\Psi_{\text{шум}}$ — погрешности, определяемые тепловыми шумами; N — неопределенное целое число ФЦ, присутствующее в ФИ.

В процессе предварительной обработки, выполняемой перед решением навигационной задачи, происходят компенсация систематических и сглаживание случайных составляющих погрешностей, однако полное их устранение, как известно, невозможно.

Для ускорения сходимости навигационного РРР-решения следует использовать результаты измерений на двух и более НЧ и беспереборные методы РН ФИ. Среди известных методов РН наиболее широко применяется метод синтезированной, или разностной, длины волны (СДВ). Диапазон однозначных измерений СДВ определяется как:

$$\Lambda_{\text{СДВ}} = \frac{c}{f_1 - f_2} = \lambda_1 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

где c — скорость света, f_1 и f_2 — масштабные (несущие) частоты, при этом $f_1 > f_2$, а λ_1 и λ_2 — соответствующие им длины волн. Другим беспереборным методом является метод некрatных шкал [2, 11], основанный на представлении масштабных частот f_i в виде дробей, описывающих их отношение к основной шкале f_0 :

$$\frac{f_0}{f_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} = \frac{P_i}{\Theta_i}, \quad i = \overline{1, n}; \quad \text{НОД}(P_i, P_{j \neq i}) = 1,$$

где λ_0 — основная длина волны, Θ — знаменатель дроби, n — число масштабных шкал, НОД — наибольший общий делитель, $P_1, P_2, \dots, P_n$ — числители дробей. Диапазон однозначных измерений дальности $\Lambda_{\text{НШ}}$ определяется следующим выражением:

$$\Lambda_{\text{НШ}} = \lambda_0 \cdot \text{НОК}(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n),$$

где НОК — наименьшее общее кратное. Метод некрatных шкал обладает преимуществом перед методом СДВ, так как диапазоны однозначных измерений этих двух методов связаны выражением вида:

$$\Lambda_{\text{СДВ}} = \lambda_1 \cdot \frac{\frac{P}{\Theta} \lambda_1}{\frac{P}{\Theta} \lambda_1 - \lambda_1} = \frac{P}{\Theta} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_1}{\lambda_1 \left(\frac{P}{\Theta} - 1 \right)} = \frac{P}{\Theta} \cdot \frac{\lambda_1}{\left(\frac{P - \Theta}{\Theta} \right)} = \frac{\Lambda_{\text{НШ}}}{P - \Theta}.$$

Из полученного соотношения видно, что диапазон однозначности для метода СДВ равен диапазону однозначных измерений метода некрatных шкал, если числитель и знаменатель дроби, аппроксимирующей отношение фазометрических шкал, различаются на единицу. Во всех остальных случаях диапазон однозначности при использовании метода некрatных шкал будет больше.

Во всех ГНСС для компенсации ионосферных погрешностей предусмотрен двухчастотный метод, который предполагает, что отношение двух НЧ образует простую дробь, что позволяет реализовать метод некрatных шкал для РН ФИ. В некоторых ГНСС отношение частот было выбрано таким образом, что для РН возможно использовать метод СДВ. Формирование некрatных фазометрических шкал в ГНСС заключается в выборе таких пар НЧ, для которых выполняется условие их согласования для РН:

$$\delta n = \text{int} \left(\sqrt{\left(P_i^2 + \Theta_i^2 \right) \cdot \delta \varphi^2 + 0,5} \right) = 0, \quad i = \overline{1, n},$$

где $\delta \varphi$ — предельная погрешность измерения дробной части ЦФ, принимающая значение от нуля до 1.

Для ГНСС ГЛОНАСС с частотным разделением сигналов НЧ для каждого НКА в частотных диапазонах $L1$ и $L2$ определяются следующими выражениями [12]:

$$f_1 = 1602 + k \cdot 0,5625 \text{ МГц } (\lambda_1 \approx 18,71 \text{ см}),$$

$$f_2 = 1246 + k \cdot 0,4375 \text{ МГц } (\lambda_2 \approx 24,06 \text{ см}),$$

где k — литера НЧ, указанная в альманахе системы. Ошибка следящей системы за фазой НЧ определяется по формуле:

$$\sigma_\lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{B_{\text{ФАП}}}{P/N_0}},$$

где P/N_0 — отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума на входе приемника, а $B_{\text{ФАП}}$ — эквивалентная шумовая ширина полосы схемы слежения за фазой НЧ [10]. Для современных образцов НАП погрешности ФИ составляют тысячные доли ФЦ. На первоначальном этапе модернизации системы ГЛОНАСС предполагалось использование третьей НЧ $f_3 = 1201,5 \text{ МГц}$ [12, 13], которую, согласно исследованиям, следует рассматривать как удачный пример введения в навигационную систему дополнительной НЧ.

В результате разложения значений НЧ на множители получим:

$$f_1 = 89 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 4 \cdot 10^5 = 1602,0; \quad f_2 = 89 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 10^5 = 1246,0;$$

$$f_3 = 89 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 10^5 = 1201,5 \text{ МГц}.$$

Таким образом, можно образовать две пары некрatных шкал:

$$\alpha_1 = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{P_1}{\Theta_1} = \frac{9}{7}; \quad \alpha_2 = \frac{f_1}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} = \frac{P_2}{\Theta_2} = \frac{4}{3}; \quad \alpha_3 = \frac{f_2}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} = \frac{P_3}{\Theta_3} = \frac{28}{27}.$$

Для каждой пары частот условия согласования принимают вид:

$$|\delta\varphi_{12}| \leq 0,043; |\delta\varphi_{13}| < 0,1; |\delta\varphi_{23}| \leq 0,012.$$

Диапазоны однозначных ФИ для каждой пары частот составляют:

$$\Lambda_{12\text{НШ}} = P_1 \cdot \lambda_1 = \Theta_1 \cdot \lambda_2 \approx 1,68 \text{ м}; \quad \Lambda_{13\text{НШ}} = P_2 \cdot \lambda_1 = \Theta_2 \cdot \lambda_3 \approx 0,75 \text{ м};$$

$$\Lambda_{23\text{НШ}} = P_3 \cdot \lambda_2 = \Theta_3 \cdot \lambda_3 \approx 6,7 \text{ м}.$$

Использование метода некрatных шкал позволяет увеличить диапазон РН на частотах f_2 и f_1 в два раза, по сравнению с методом СДВ. Диапазон однозначных измерений на частотах f_2 и f_3 равен 6,7 м и соответствует диапазону однозначных измерений с использованием трех некрatных шкал, но при значительно меньших (в 3,5 раза) требованиях к точности измерения дробной части ФЦ.

При выборе параметров новых сигналов модернизируемой системы ГЛОНАСС разработчиками учитывались следующие основные ограничительные факторы:

— новые сигналы должны оставаться в полосе частот, отведенной в настоящее время для ГЛОНАСС, по причине длительности и сложности процедур согласования на международном уровне заявки на новый частотный диапазон;

— мощность спектральных составляющих новых сигналов не должна превышать установленные пороговые значения в радиоастрономическом диапазоне;

— технические трудности объединения сигналов в диапазонах $L2$ и $L3$ для излучения через общую антенну;

— несущие и тактовые частоты сигналов с кодовым разделением должны быть кратны частоте $f_b = 1,023$ МГц, которая принята за базовую.

В соответствии с новыми разработанными интерфейсными контрольными документами сигналы открытого доступа с кодовым разделением системы ГЛОНАСС будут излучаться в диапазоне $L1$ на НЧ $f_1 = 1565f_b = 1600,995$ МГц, в диапазоне $L2$ на НЧ $f_2 = 1220f_b = 1248,06$ МГц и в диапазоне $L3$ на НЧ $f_3 = 1175f_b = 1202,025$ МГц [12]. Реализация метода СДВ для данных частот затруднительна, так как в разностной длине волны не укладывается целое число длин волн ни одной из указанных частот. Отношение заданных НЧ представляется дробями:

$$\alpha_1 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{244}{313}; \quad \alpha_2 = \frac{f_3}{f_1} = \frac{235}{313}; \quad \alpha_3 = \frac{f_3}{f_2} = \frac{235}{244}.$$

Условия согласования шкал для указанных пар частот принимают вид: $|\delta\varphi_{12}| \leq 0,0012$; $|\delta\varphi_{13}| < 0,0012$; $|\delta\varphi_{23}| \leq 0,00142$. Такие погрешности измерения дробной части ФЦ в НАП в настоящее время недостижимы, и соответственно реализация метода некрatных шкал невозможна. Необходимо отметить, что реализация переборных алгоритмов также существенно затруднена, поскольку большая высота дроби свидетельствует об очень большом количестве комбинаций неоднозначностей [14]. Таким образом, несмотря на то что некоторые НКА системы ГЛОНАСС излучают сигналы на трех НЧ, в настоящее время возможна реализация только двухчастотных алгоритмов, которые будут рассмотрены далее.

После расчета элементов базиса в соответствии с теоремой о дробных частях вычисляется целое число ФЦ выбранной НЧ и рассчитывается дальность с использованием кодовых измерений R_k , используемых для грубой оценки числа ФЦ, укладывающихся в измеряемой дальности [15].

Для пары частот f_1 и f_2 при выборе в качестве основной частоты f_1 математические выражения РН имеют следующий вид:

$$r_{12} = 4 \cdot \text{int} \left(\frac{\varphi_2}{2\pi} \cdot 9 - \frac{\varphi_1}{2\pi} \cdot 7 + 0,5 \right) \bmod 9;$$

$$R_{f_1} = \left(\left(r_{12} + \frac{\varphi_1}{2\pi} \right) + \text{int} \left(\frac{\text{int} \left(\frac{R_K}{\lambda_1} + 0,5 \right) - r_{12}}{9} + 0,5 \right) \cdot 9 \right) \cdot \lambda_1,$$

где R_{f_1} и R_{f_2} — полные вычисленные значения фазовой дальности на соответствующих частотах, r_{12} и r_{21} — число ФЦ в диапазоне однозначности фазовой измерительной системы.

Для пары частот f_1 и f_2 при выборе в качестве основной частоты f_2 математические выражения РН имеют следующий вид:

$$r_{21} = 4 \cdot \text{int} \left(\frac{\varphi_1}{2\pi} \cdot 7 - \frac{\varphi_2}{2\pi} \cdot 9 + 0,5 \right) \bmod 7;$$

$$R_{f_2} = \left(\left(r_{21} + \frac{\varphi_2}{2\pi} \right) + \text{int} \left(\frac{\text{int} \left(\frac{R_K}{\lambda_2} + 0,5 \right) - r_{21}}{7} + 0,5 \right) \cdot 7 \right) \cdot \lambda_2.$$

Результаты моделирования подтверждают устойчивость алгоритмов РН к систематическим погрешностям, вызванным смещением измерительных шкал друг относительно друга, которая определяется периодическим характером интерференционной картины (повторением моментов совпадения дробных частей) и инвариантностью квадрата пространственно-временного интервала при переходе к любой инерциальной системе отсчета [16].

Представленные алгоритмы РН двухчастотных измерений в системе ГЛОНАСС были использованы при экспериментальной обработке результатов измерений. При проведении эксперимента были использованы результаты измерений, записанные в файле формата RINEX v.3.04 от 24 декабря 2021 г. Обработке подвергались данные, полученные по НКА PRN №24 системы ГЛОНАСС. На рис. 1 и 2 представлены выборки из 200 последовательных измерений дальности, доплеровского смещения (f_d), фазы и отношения сигнал/шум (с/ш) сигналов $L1$ — СТ; $L2$ — СТ, которые соответствуют малым значениям доплеровского сдвига частоты на время 11 ч 11 мин 20 с. Результаты обработки в виде зависимости целого числа ФЦ и полной фазовой дальности для соответствующей частоты от порядкового номера измерения в выборке приведены на рис. 3 и 4. Таким образом, результаты экспериментальной обработки полностью подтверждают работоспособность предложенного метода формирования некратных шкал в радиотехнических системах траекторных измерений, использующих ФИ.

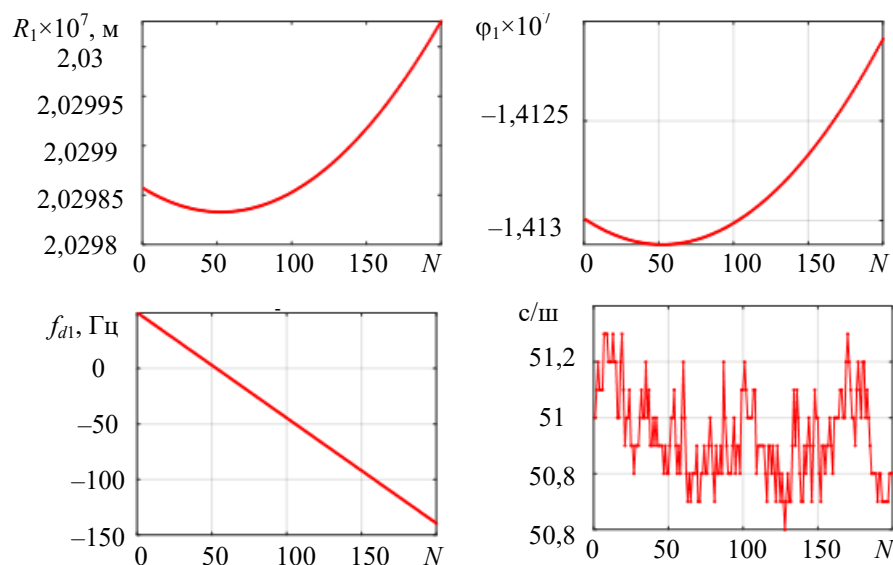


Рис. 1

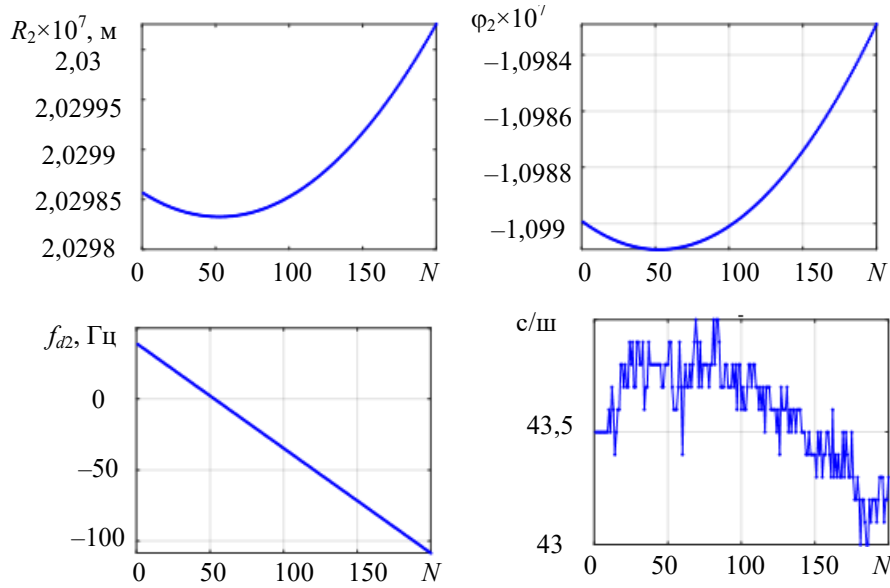


Рис. 2

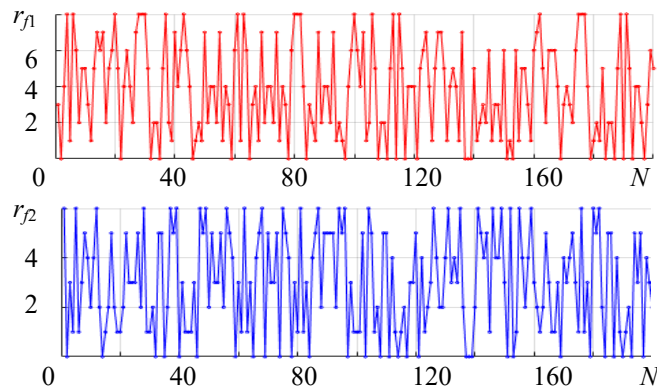


Рис. 3

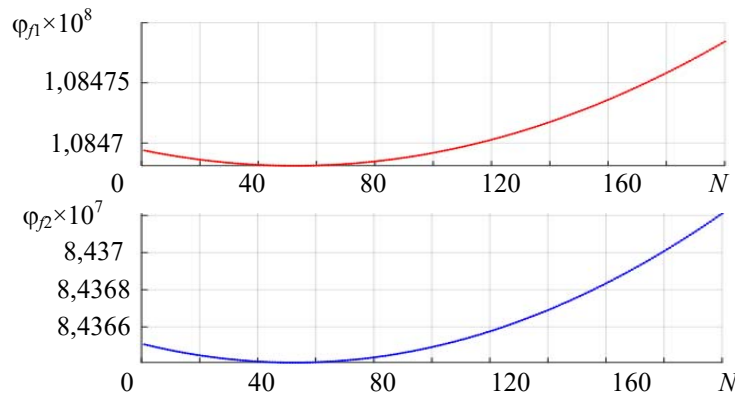


Рис. 4

Таким образом, экспериментальная обработка результатов измерений на двух несущих частотах системы ГЛОНАСС подтвердила работоспособность разработанного метода и алгоритмов разрешения неоднозначности при погрешностях ФИ и наличии межчастотных задержек.

Высокоточное позиционирование обеспечивается при использовании корректирующей информации в виде поправок к координатам спутников и смещениям показаний бортовых часов, однако в отсутствие этих данных повысить точность одномоментных измерений без существенного увеличения времени сходимости навигационного решения возможно, используя методы, уменьшающие влияние целочисленной неоднозначности ФИ. На основе рассмотренного метода некратных шкал могут быть разработаны алгоритмы разрешения неод-

неоднозначности фазовых измерений в зарубежных спутниковых навигационных системах GPS, Galileo, Beidou [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DeJoune P. J., Tiberius C. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. Delft: Geodetic Computing Centre, 1996. 50 p.
2. Пат. РФ 2157547 С1. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. Заявка № 99120425/09 от 24.09.1999. Оpubл. 10.10.2000.
3. Пат. РФ 2213979 С2. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе GPS / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. Заявка № 2000132342/09 от 22.12.2000. Оpubл. 10.10.2003.
4. Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., and Liu J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations // Journal of Geodesy. 2008. Vol. 82. P. 389—399.
5. Geng J., Meng X., Dodson A. H. and Teferle F. N. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison // Journal of Geodesy. 2010. Vol. 84. P. 569—581.
6. Bertiger W., Desai D. Sh., Haines B., Harvey N., Moore W. A., Owen S., Weiss P. J. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data // Journal of Geodesy. 2010. Vol. 84, is. 5. P. 327—337.
7. Laurichesse D. and Mercier F. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results // 23rd Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland, OR, September 21—24, 2010, P. 2534—2544.
8. Tolman B., Harris R. B., Gaussiran T., Munton D., Little J., Mach R., Nelsen S., Renfro B., Schlossberg D. The GPS Toolkit – Open Source GPS Software // Proc. of the 17th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach, California, September 2004.
9. GIPSY-OASIS II. How it works / Ed. by Th. Gregorius. Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne. October, 1996 [Электронный ресурс]: <<http://www.gps.caltech.edu/classes/ge167/file/gipsy-oasisIIHowItWorks.pdf>>.
10. Пономарев В. А., Пономарев А. В., Пономарева Т. М., Бахолдин В. С. Разрешение неоднозначности в информационно-измерительных многошкальных приборах и системах. СПб: ВИКУ, 2001. 164 с.
11. Власов И. Б., Карутин С. Н. Беспереборный метод раскрытия неоднозначности измерений фазы в угломерной навигационной аппаратуре системы GPS // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2004. № 3. С. 62—75.
12. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития / Под ред. А. И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.
13. Дубинко Ю. С., Бахолдин В. С. Разрешение неоднозначности фазовых измерений в трехчастотной навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем // Труды ИПА РАН. 2009. № 20. С. 418—422.
14. Бахолдин В. С. Беспереборный метод разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС // Радиотехника. 2015. № 11. С. 105—111.
15. Гужов В. И., Кабак Е. С., Орлов И. С. Использование модулярной арифметики при фазовых измерениях // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1(11). С. 97—107.
16. Забелин А. В. Математическая модель метода совпадения дробных частей порядка интерференции // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 8—12.
17. Бахолдин В. С., Леконцев Д. А. Результаты моделирования и экспериментальной обработки фазовых измерений системы GPS с использованием беспереборных алгоритмов разрешения неоднозначности // Навигация и гидрография. 2023. № 71. С. 34—46.

Сведения об авторах

- Владимир Станиславович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации; E-mail: vka@mil.ru
- Дмитрий Александрович Леконцев** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. DeJounge P.J., Tiberius C. *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects*, Delft, Geodetic Computing Centre, 1996, 50 p.
2. Patent RU 2157547 C1, *Sposob razresheniya neodnoznachnosti fazovykh izmereniy* (A Method for Resolving the Ambiguity of Phase Measurements), V.A. Ponomarev, V.S. Bakhholdin, Patent application no. 99120425/09, Priority 24.09.1999, Published 10.10.2000. (in Russ.)
3. Patent RU 2213979 C2, *Sposob razresheniya neodnoznachnosti fazovykh izmereniy v sisteme GPS* (A Method for Resolving the Ambiguity of Phase Measurements in the GPS System), V.A. Ponomarev, V.S. Bakhholdin, Patent application no. 2000132342/09, Priority 22.12.2000, Published 10.10.2003. (in Russ.)
4. Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J. *Journal of Geodesy*, 2008, vol. 82, pp. 389–399.
5. Geng J., Meng X., Dodson A.H. and Teferle F.N. *Journal of Geodesy*, 2010, vol. 84, pp. 569–581.
6. Bertiger W., Desai D. Sh., Haines B., Harvey N., Moore W.A., Owen S., Weiss P.J. *Journal of Geodesy*, 2010, no. 5(84), pp. 327–337.
7. Laurichesse D. and Mercier F. *23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Portland, OR, September 21–24, 2010, pp. 2534–2544.
8. Tolman B., Harris R.B., Gaussiran T., Munton D., Little J., Mach R., Nelsen S., Renfro B., Schlossberg D. *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach, California, September 2004.
9. Gregorius Th., ed., *GIPSY-OASIS II. How it works*, October, 1996, <http://www.gps.caltech.edu/classes/ge167/file/gipsy-oasisIIHowItWorks.pdf>.
10. Ponomarev V.A., Ponomarev A.V., Ponomareva T.M., Bakhholdin V.S. *Razresheniye neodnoznachnosti v informatsionno-izmeritel'nykh mnogoshkal'nykh priborakh i sistemakh* (Ambiguity Resolution in Information-Measuring Multiscale Instruments and Systems), St. Petersburg, 2001, 164 p. (in Russ.)
11. Vlasov I.B., Karutin S.N. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2004, no. 3, pp. 62–75. (in Russ.)
12. Perov A.I., ed., *GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya* (GLONASS. Modernization and Development Prospects), Moscow, 2020, 1072 p. (in Russ.)
13. Dubinko J.S., Bakhholdin V.S. *Transactions of IAA RAS*, 2009, no. 20, pp. 418–422. (in Russ.)
14. Bakhholdin V.S. *Radioengineering*, 2015, no. 11, pp. 105–111. (in Russ.)
15. Guzhov V.I., Kabak E.S., Orlov I.S. *Automatics & Software Enginery*, 2015, no. 1(11), pp. 97–107. (in Russ.)
16. Zabelin A.V. *Measurement Techniques*, 2011, no. 7, pp. 750–757.
17. Bakhholdin V.S., Lekontsev D.A. *Navigation and Hydrography*, 2023, no. 71, pp. 34–46. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|-------------------------------|---|--|
| Vladimir S. Bakhholdin | — | PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Space Radiolocation and Radio Navigation; E-mail: vka@mil.ru |
| Dmitry A. Lekontsev | — | PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Space Radiolocation and Radio Navigation; E-mail: vka@mil.ru |

Received 13.09.2023; approved after reviewing 25.09.2023; accepted for publication 17.12.2023.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ ДОЛЕЙ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ
МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Е. Э. Попов*, В. В. Виткин

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

Аннотация. Рассмотрено влияние давления на результаты измерения объемных долей газовых компонентов методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Выявлен нелинейный характер влияния давления на световой поток в спектральном диапазоне от 1380 до 1399 см⁻¹ для изотополога диоксида углерода ¹²CO₂ и в спектральном диапазоне от 1361 до 1379 см⁻¹ — для изотополога диоксида углерода ¹³CO₂. Измерены спектры комбинационного рассеяния газовых смесей известного изотопного состава при различном давлении. Нелинейным методом наименьших квадратов найдены функция отклонения интегрального светового потока от линейной зависимости и ее коэффициенты. Эту функцию предложено использовать для вычисления поправочных коэффициентов в калибровочных функциях. Калибровочные функции связали регистрируемый приемником излучения световой поток с объемной долей молекул исследуемого вещества. Применение поправочных коэффициентов позволило повысить точность измерения объемной доли исследуемых газовых компонентов.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние света, влияние давления на спектр комбинационного рассеяния, измерение объемной доли, диоксид углерода

Благодарности: работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования № 075-15-2021-1349.

Ссылка для цитирования: Попов Е. Э., Виткин В. В. Влияние давления на результаты измерения объемных долей газовых компонентов методом спектроскопии комбинационного рассеяния // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 171—177. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-171-177.

INFLUENCE OF PRESSURE ON THE RESULTS OF MEASURING THE VOLUME FRACTIONS
OF GAS COMPONENTS USING RAMAN SPECTROSCOPY

E. E. Popov*, V. V. Vitkin

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

Abstract. The influence of pressure on the results of measuring the volume fractions of gas components using Raman spectroscopy is considered. The nonlinear nature of the influence of pressure on the light flux is revealed in the spectral range from 1380 to 1399 cm⁻¹ for the isotopologue of carbon dioxide ¹²CO₂ and in the spectral range from 1361 to 1379 cm⁻¹ for the isotopologue of carbon dioxide ¹³CO₂. The Raman spectra of gas mixtures of known isotopic composition are measured at different pressures. The function of deviation of the integral light flux from the linear dependence and its coefficients are found using the nonlinear least squares method. It is proposed to use this function to calculate correction factors in calibration functions. Calibration functions relate the light flux recorded by the radiation receiver to the volume fraction of molecules of the substance under study. The use of correction factors enables to increase the accuracy of measuring the volume fraction of the gas components under study.

Keywords: Raman scattering, influence of pressure on the Raman spectrum, volume fraction measurement, carbon dioxide

Acknowledgment: This work was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education No. 075-15-2021-1349.

For citation: Popov E. E., Vitkin V. V. Influence of pressure on the results of measuring the volume fractions of gas components using Raman spectroscopy. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 171—177 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-171-177.

Введение. Изменение интенсивности линии спектра комбинационного рассеяния, или уширение, обычно рассматривается только в газовых пробах высокого давления, однако даже при относительно низком давлении некоторые факторы приводят к изменению профиля спектрального контура комбинационного рассеяния [1—12]. Хорошо известным примером такого фактора является влияние давления на ширину спектрального контура линии комбинационного рассеяния [2—4].

В работе [2] рассмотрено влияние давления на ширину спектра комбинационного рассеяния для азота, кислорода, оксида и диоксида углерода. Оценка проводилась с учетом коррекции ширины спектра из-за перекрытия спектральных линий. В [2] также упоминается, что уширение происходит с небольшим сдвигом в красную сторону спектра, а каждая спектральная линия имеет свой коэффициент уширения линии; также отмечается уменьшение коэффициента уширения спектра с ростом давления.

В работе [3] отмечено уширение спектральной линии комбинационного рассеяния вследствие обмена энергии между колебательными и вращательными уровнями.

В статье [4] предложено при анализе учитывать уширение спектра через специальную функцию, вносящую поправку в давление чистого газа при калибровке. В работе установлено, что при различных порциях CO_2 в CH_4 уширение происходит по-разному — чем больше доля, тем быстрее с ростом давления уширяется спектр.

Другим фактором изменения профиля спектрального контура является изменение относительной интенсивности пиков комбинационного рассеяния для диад, триад или полиад в спектре. К примеру, в работе [5] показано, что относительная интенсивность пиков комбинационного рассеяния диоксида углерода зависит от давления газа в кювете. Анализ проводился с учетом сжимаемости газа, и в результате была получена зависимость относительной интенсивности комбинационного сигнала от давления. Авторы пришли к выводу, что интенсивность зависит от сжимаемости газа, что влияет на перераспределение энергии между колебательными модами и в итоге приводит к изменению относительной интенсивности пиков комбинационного рассеяния.

Еще одним немаловажным фактором изменения профиля спектрального контура является положение его максимума. К примеру, в статье [6] положение максимума менялось с изменением давления. Также на положение максимума оказывали влияние и другие газы, входящие в газовую смесь.

В работе [8] для метана проанализирована зависимость положения пика комбинационного рассеяния от давления и установлено, что пик комбинационного рассеяния сдвигается в область низких частот с увеличением давления газа в кювете.

В статье [10] рассмотрены различные изменения в спектре, в частности, уширение спектра вследствие столкновения молекул. В работе изучался азот и наблюдалось различное уширение вращательных и колебательных линий. Установлено, что в области значений давления от 0 до 25 атмосфер плотность молекул сравнительно мала и длительность столкновения намного меньше интервала между столкновениями, следовательно, нет перекрытия уровней и можно применять теорию столкновительного уширения. В статье также определено влияние температуры на интенсивность комбинационного рассеяния. Вращательное уширение вводило базовую линию в наблюдаемую ширину Q-ветви и являлось значительно больше столкновительного уширения на широком интервале температур.

В работе [11] установлено, что при высоком давлении происходит смещение линий (пердача интегральной энергии между спектральными компонентами), в то время как при низком давлении энергия перераспределяется между вращательными и вибрационно-вращательными уровнями (Q-ветвь сужается, а O-линии и S-линии расширяются). В случае, когда давление меньше 70 атм, при комнатной температуре эффект становится незначительным.

Из указанных работ видно, что влияние давления на спектр комбинационного рассеяния заключается в изменении как положения спектрального пика, так и его ширины и интенсивности. Такое сложное явление требует внесения поправок в калибровочные функции газоанализаторов, работающих на принципе анализа спектров комбинационного рассеяния.

Ранее нами в соавторстве с коллегами был разработан прибор для анализа объемных долей $^{12}\text{CO}_2$ и $^{13}\text{CO}_2$ в газовой смеси [12]. Отмечено, что включение давления в калибровочные функции позволяет уменьшить ошибку определения объемной доли исследуемого газового компонента. Перераспределение энергии между колебательными состояниями может отрицательно сказаться на точности получаемых результатов. Для корректной работы прибора необходимо во время его калибровки учесть влияние давления на световой поток, регистрируемый приемником излучения. Это особенно важно учесть при изотопном анализе газовых смесей, так как, по нашим данным, в литературе отсутствует информация по изменению спектров комбинационного рассеяния $^{13}\text{CO}_2$.

Методы. Количественный состав газовой смеси определялся путем анализа спектров комбинационного рассеяния. В состав газоанализатора входили источник излучения, кювета, монохроматор и матричный приемник излучения. Устройство газоанализатора приведено в работе [12].

Регистрируемый приемником излучения световой поток (Φ) комбинационного рассеяния света для j -й колебательной моды, согласно работе [13], описывается выражением:

$$\Phi = \eta_S \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_L(\nu) \sigma_R^0(\nu_L - \nu_j)^4 D \delta_z \cdot d\nu, \quad (1)$$

где η_S — эффективность оптической системы; I_L — интенсивность лазерного излучения; ν — частота излучения; ν_j — частота j -й колебательной моды; ν_L — частота лазерного излучения; σ_R^0 — сечение комбинационного рассеяния, не зависящее от частоты падающей электромагнитной волны; D — плотность молекул; δ_z — длина трассы лазерного пучка, с которой собирается рассеянное излучение.

Связь давления и плотности молекул может быть описана выражением:

$$D = \frac{P n_i \text{Na}}{RT}, \quad (2)$$

где P — давление газовой смеси в кювете; n_i — количество вещества (моль) i -го компонента газовой смеси; Na — число Авогадро; R — универсальная газовая постоянная; T — температура газа в кювете.

Из выражений (1) и (2) видно, что без учета сжимаемости газа зависимость светового потока от давления описывается линейным выражением типа $y = k \cdot x$. Влияние сжимаемости газа на спектральные характеристики комбинационного рассеяния света описано в работе [5].

Для проведения экспериментов была изготовлена специальная газовая смесь с известным изотопным соотношением диоксида углерода. Объемная доля $^{12}\text{CO}_2$ в используемой газовой смеси составила $3,92 \pm 0,1 \%$, а объемная доля $^{13}\text{CO}_2$ — $0,0437 \pm 0,0005 \%$.

Для получения информации об объемной доле каждого компонента выполнялись измерение и анализ спектра комбинационного рассеяния. Для компонента $^{12}\text{CO}_2$ анализ спектра осуществлялся в области от 1380 до 1399 см^{-1} , для $^{13}\text{CO}_2$ — в области от 1361 до 1379 см^{-1} . Анализ включал в себя нормирование на значение мощности лазерного излучения, на давление газовой смеси внутри кюветы, на длительность экспозиции приемника излучения.

Наблюдаемое отклонение интегрального светового потока от линейной функции ($d\Phi$) аппроксимировалось обобщенной функцией сигмоиды. Эта функция позволяет описывать s -образные кривые, что обусловлено особенностями изменений, которые, как продемонстрировано в рассмотренных выше работах, сокращаются с ростом давления. Расчет отклонения интегрального светового потока от линейной функции выполнялся по формуле:

$$d\Phi = \frac{K_1}{K_2 + K_3 \cdot \exp(K_4 + K_5 \times P)}, \quad (3)$$

где K_1 — K_5 — коэффициенты функции.

Аппроксимация проводилась нелинейным методом наименьших квадратов с применением функции `curve_fit` библиотеки `scipy.optimize` для языка программирования Python версии 3.11.

Алгоритм анализа спектров комбинационного рассеяния, применявшийся во время эксперимента, отличается от используемого в самом приборе: значения интегрального светового потока нормируются на значение объемной доли, длительность экспозиции и мощность лазерного излучения.

Калибровочные функции, которые связывают измеренную величину интегрального светового потока с объемной долей компонента газовой смеси, с учетом поправочной функции (3) принимают следующий вид:

$$X_m = \frac{k_m \Phi_m}{PWt} + d\Phi(P), \quad (4)$$

где X_m — объемная доля компонента; m — индекс, обозначающий компонент газовой смеси ($m = 12$ для $^{12}\text{CO}_2$, 13 — для $^{13}\text{CO}_2$); k — калибровочный коэффициент; Φ_m — интегральный световой поток; W — мощность лазерного излучения; t — длительность экспозиции приемника оптического излучения; $d\Phi(P)$ — поправочная функция, вычисляемая с помощью выражения (3).

Результаты. В ходе эксперимента получены данные о влиянии давления на интегральный световой поток спектрального пика комбинационного рассеяния света для $^{12}\text{CO}_2$ и $^{13}\text{CO}_2$ в области от 1380 до 1399 см^{-1} и от 1361 до 1379 см^{-1} соответственно. Для линейной аппроксимации тангенс угла определялся по значению интегрального светового потока при давлении внутри газовой кюветы $P = 1$ атм. Результаты сравнения экспериментальных данных с теоретическими приведены на рис. 1 (а — для $^{12}\text{CO}_2$; б — для $^{13}\text{CO}_2$).

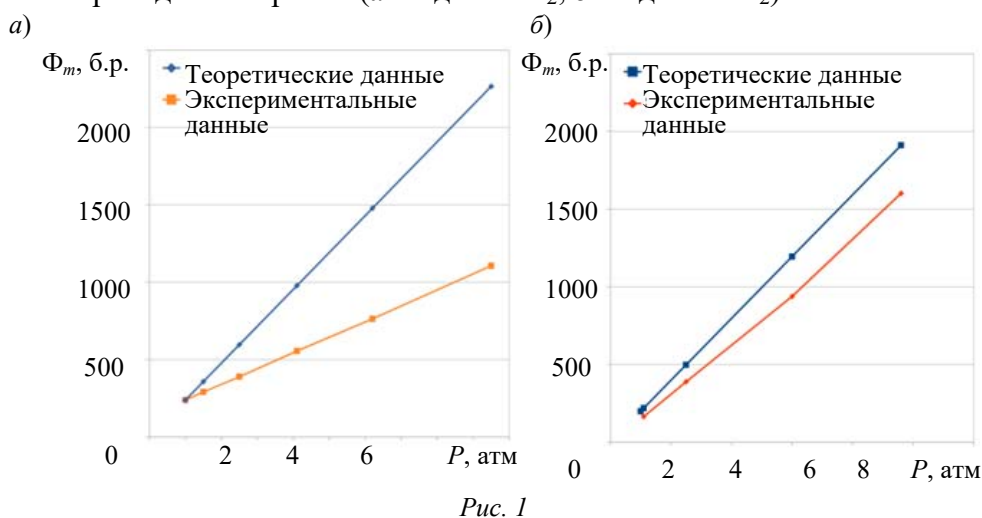


Рис. 1

Из рис. 1 видно, что с ростом давления увеличивается отклонение интегрального светового потока от теоретического значения. В области давления газовой кюветы приблизительно до 2 атм отклонение сопоставимо со стандартным отклонением измеренной величины, при этом для $^{12}\text{CO}_2$ отклонение выражено более ярко, чем для $^{13}\text{CO}_2$. На рис. 2 приведена аппрок-

симация отклонения экспериментальных данных по интегральному световому потоку от теоретического значения (a — для $^{12}\text{CO}_2$; b — для $^{13}\text{CO}_2$).

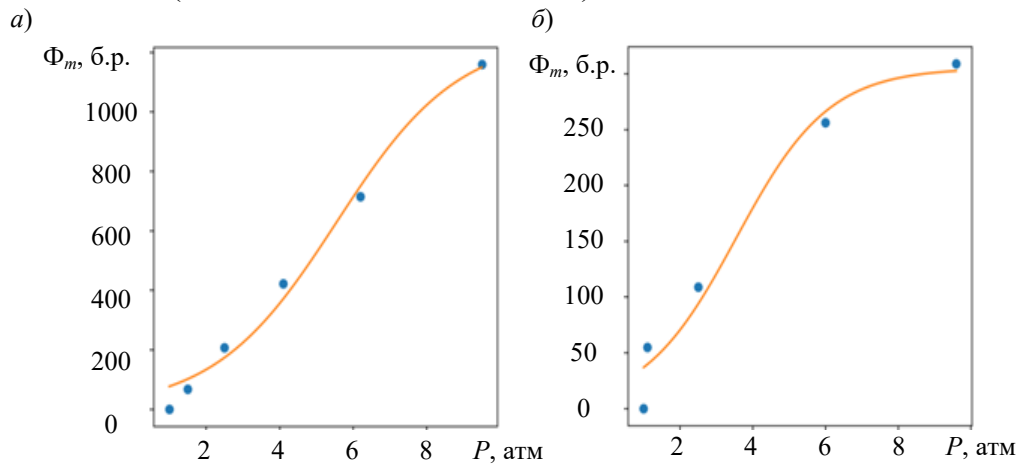


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что полученное отклонение экспериментальных и теоретических данных с высокой точностью описывается выражением (3). Коэффициент детерминации для $^{12}\text{CO}_2$ составил 0,9994, для $^{13}\text{CO}_2$ — 0,97. Коэффициенты функции (3), полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных, приведены в таблице.

Значения коэффициентов для функции аппроксимации

Коэффициент	$^{12}\text{CO}_2$	$^{13}\text{CO}_2$
K_1	84,28	4,9
K_2	0,07	0,016
K_3	0,83	0,205
K_4	0,83	0,216
K_5	–0,6	–0,78

Обсуждение. В ходе работы получены функции отклонения интегрального светового потока от линейной функции, которые были использованы для внесения поправки в калибровочные уравнения.

Разница в зависимостях интегрального светового потока от давления для разных компонентов объясняется различными сечениями комбинационного рассеяния каждого из изотопов диоксида углерода. Сравнительно низкий коэффициент детерминации $^{13}\text{CO}_2$ объясняется меньшим отношением сигнал/шум из-за меньшего значения объемной доли данного компонента. Значительная разница в функции отклонения экспериментальных и теоретических данных требует дополнительного изучения.

В дальнейшей работе необходимо учесть влияние сжимаемости газа на плотность молекул. Влияние давления на плотность молекул может быть рассчитано с помощью данных, приведенных в работе [14]. Также одним из факторов, влияющих на интегральный световой поток, является ослабление лазерного излучения при прохождении через входное окно кюветы — оно может быть нелинейным из-за деполяризации излучения вследствие влияния давления на форму окна кюветы [15]. Деполяризация лазерного излучения уменьшает эффективность просветляющего покрытия нанесенного на окна кюветы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Д. В., Матросов И. И. Влияние неидеальности газов на интенсивности спектров комбинационного рассеяния // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 12/2. С. 194—197.
2. Jammu K. S., John G. E. S., & Welsh H. L. Pressure broadening of the rotational Raman lines of some simple gases // Canadian Journal of Physic. 1966. Vol. 44, N 4. P. 797—814.

3. Welsh H. L., Crawford M. F., Thomas T. R., Love G. R. Raman spectroscopy of low pressure gases and vapors // *Canadian Journal of Physics*. 1952. Vol. 30, N 5. P. 577—596.
4. Tanichev A. S., Petrov D. V. Pressure broadening in Raman spectra of CH₄–N₂, CH₄–CO₂, and CH₄–C₂H₆ gas mixtures // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2023. Vol. 291. P. 122396.
5. Petrov D. V., Matrosov I. I. Pressure dependence of the Raman signal intensity in high-pressure gases // *Journal of Raman Spectroscopy* 2017. Vol. 48, N 3. P. 474—478.
6. Petrov D. V., Matrosov I. I., Zaripov A. R., Maznoy A. S. Effects of pressure and composition on Raman spectra of CO–H₂–CO₂–CH₄ mixtures // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2019. Vol. 215. P. 363—370.
7. Petrov D. V. Pressure dependence of peak positions, half widths, and peak intensities of methane Raman bands (ν_2 , $2\nu_4$, ν_1 , ν_3 , and $2\nu_2$) // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2017. Vol. 48, N 11. P. 1426—1430.
8. Kuczyński S., Włodek T., Smulski R., Dąbrowski K., Krakowiak M., Barbacki J., Pawłowski M. Application of Raman spectroscopy analysis in unconventional natural gas reservoirs—density and pressure dependence on Raman signal intensity // *AGH Drilling, Oil, Gas*. 2017. Vol. 34, N 3. P. 761—774.
9. Weber A. Raman spectroscopy of gases and liquids. NY: Springer Science & Business Media, 2012.
10. Mikhailov G. V. The influence of temperature and pressure on the Raman spectrum of nitrogen // *Soviet Physics JETP*. 1959. Vol. 36, N 9. P. 974—978.
11. Haller T. W., Varghese P. L. Measurements of pressure broadening of N₂ in the anisotropic tensor component of spontaneous Raman spectra // *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 224. P. 166—176.
12. Popov E., Polishchuk A., Kovalev A., Vitkin V. Raman Spectroscopy for Urea Breath Test // *Biosensors*. 2023. Vol. 13, N 6. P. 609.
13. McCreery R. L. Raman spectroscopy for chemical analysis. Toronto: John Wiley & Sons Inc., 2000.
14. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database. N 69 / Ed. by P. J. Linstrom, W. G. Mallard. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 2023.
15. Perry S., Sharko P. T., Jonas J. Technique for Measuring the Amount of Pressure-Induced Polarization Scrambling by Optical Windows in High Pressure Light Scattering Cells // *Appl. Spectrosc.* 1983. Vol. 37. P. 340—342.

Сведения об авторах

Евгений Эдуардович Попов

— Университет ИТМО, Институт перспективных систем передачи данных; руководитель группы НТР; E-mail: eepopov@itmo.ru

Владимир Владимирович Виткин

— канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО, Институт перспективных систем передачи данных; руководитель лаборатории ЛООКС; E-mail: vitkin@itmo.ru

Поступила в редакцию 26.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Petrov D.V., Matrosov I.I. *Russian Physics Journal*, 2017, no. 12/2(60), pp. 194–197. (in Russ.)
2. Jammu K.S., John G.E.S., & Welsh H.L. *Canadian Journal of Physic*, 1966, no. 4(44), pp. 797–814.
3. Welsh H.L., Crawford M.F., Thomas T.R., Love G.R. *Canadian Journal of Physics*, 1952, no. 5(30), pp. 577–596.
4. Tanichev A.S., Petrov D.V. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, vol. 291, pp. 122396.
5. Petrov D.V., Matrosov I.I. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2017, no. 3(48), pp. 474–478.
6. Petrov D.V., Matrosov I.I., Zaripov A.R., Maznoy A.S. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, vol. 215, pp. 363–370.
7. Petrov D.V. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2017, no. 11(48), pp. 1426–1430.
8. Kuczyński S., Włodek T., Smulski R., Dąbrowski K., Krakowiak M., Barbacki J., Pawłowski M. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 2017, no. 3(34), pp. 761–774.
9. Weber A. *Raman spectroscopy of gases and liquids*, NY, Springer Science & Business Media, 2012.
10. Mikhailov G.V. *Soviet Physics JETP*, 1959, no. 9(36), pp. 974–978.
11. Haller T.W., Varghese P.L. *Combustion and Flame*, 2021, vol. 224, pp. 166–176.
12. Popov E., Polishchuk A., Kovalev A., Vitkin V. *Biosensors*, 2023, no. 6(13), pp. 609.
13. McCreery R.L. *Raman spectroscopy for chemical analysis*, Toronto, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
14. Linstrom P.J., Mallard W.G., eds., *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database N 69*, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 2023.

15. Perry S., Sharko P.T., Jonas J. *Appl. Spectrosc.*, 1983, vol. 37, pp. 340–342.

Data on authors

- Evgeniy E. Popov** — ITMO University, Institute of Advanced Data Transfer Systems; Head of Scientific and Technical Development Group; E-mail: eepopov@itmo.ru
- Vladimir V. Vitkin** — PhD; ITMO University, Institute of Advanced Data Transfer Systems; Head of Laboratory of Optoelectronic Support for Cyber-Physical Systems; E-mail: vitkin@itmo.ru

Received 26.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 17.12.2023.

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

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

УДК53.091, 620.179.142, 620.174.21
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-178-185

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
РАССЕЯНИЯ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЗЕМНОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА
И УПРУГОИЗОГНУТОЙ ТРУБЫ**

С. М. Кулак*, Д. Ф. Нерадовский, В. В. Проботюк

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия,
general@tyuiu.ru*

Аннотация. С целью установления причин периодического знакопеременного распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности подземного газопровода исследована напряженность магнитного поля рассеяния H на поверхности протяженной трубы из стали Ст20 с упругоизогнутым в виде арки участком. Измерения H проводились касательно к трубе и по нормали. Установлено, что знакопеременные напряжения, возникающие в стенке упругоизогнутой трубы, являются причиной ее неравномерного и неоднородного намагничивания в магнитном поле Земли, а следовательно — периодического знакопеременного изменения магнитного поля рассеяния, измеренного на ее поверхности. Показано, что „длина волны“ изменения нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного рассеяния трубы сопоставима с протяженностью L созданной на ней арки, а их максимумы смещены друг относительно друга на $L/2$. Сделан вывод о том, что участки подземных нефтегазопроводов (арки), испытывающие изгибные деформации, намагничиваются в магнитном поле Земли неоднородно, что вызывает периодические изменения величины и направления магнитного поля рассеяния на их поверхности. Напряженное состояние в таких участках резко изменяется, по сравнению с расчетным, состояние изоляции отклоняется от нормы, и в совокупности возникают предпосылки к стресс-коррозионным разрушениям. Предлагается отслеживать изменения положения магистрального трубопровода в грунте в процессе эксплуатации относительно проектного, а также контролировать сезонную динамику напряженного состояния в области изгибной деформации магнитным методом с целью оценки ресурса и несущей способности.

Ключевые слова: магнитное поле рассеяния, деформация, напряженное состояние, газопровод, магнитоупругий эффект, арка газопровода

Ссылка для цитирования: Кулак С. М., Нерадовский Д. Ф., Проботюк В. В. Закономерности распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности подземного магистрального газопровода и упругоизогнутой трубы // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 178—185. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-178-185.

**PATTERNS OF MAGNETIC STRAY FIELD DISTRIBUTION ALONG THE SURFACE
OF AN UNDERGROUND MAIN GAS PIPELINE
AND AN ELASTICALLY BENT PIPE**

S. M. Kulak*, D. F. Neradovsky, V. V. Probotyuk

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
general@tyuiu.ru*

Abstract. In order to establish the causes of the periodic alternating distribution of the magnetic stray field along the surface of an underground gas pipeline, the strength of the magnetic stray field H on the surface of an extended pipe

made of St20 steel with an elastically bent section in the form of an arch is investigated. H measurements are carried out both tangentially to the pipe and normal to it. It is been established that the alternating stresses arising in the wall of an elastically curved pipe are the cause of its uneven and inhomogeneous magnetization in the Earth's magnetic field, and, consequently, the periodic alternating change in the magnetic stray field measured on its surface. The "wavelengths" of the changes in the normal and tangential components of the scattered magnetic field strength H of the pipe are shown to be comparable to the length L of the arch created on it, and their maxima are shifted relative to each other by half L . It is concluded that sections of underground oil and gas pipelines (arches), experiencing bending deformations, are magnetized in the Earth's magnetic field non-uniformly, which causes periodic changes in the magnitude and direction of the magnetic stray field on their surface. The stress state in such areas changes sharply compared to the calculated one, the state of the insulation deviates from the norm, and as a result, preconditions arise for stress-corrosion destruction. It is proposed to monitor changes in the position of the main pipeline in the ground during operation relative to the design one, as well as to monitor the seasonal dynamics of the stress state in the area of flexural deformation using the magnetic method in order to assess the service life and bearing capacity.

Keywords: magnetic stray field, deformation, stress state, gas pipeline, magnetoelastic effect, gas pipeline archway

For citation: Kulak S. M., Neradovsky D. F., Probotyuk V. V. Patterns of magnetic stray field distribution along the surface of an underground main gas pipeline and an elastically bent pipe. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 178—185 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-178-185.

Введение. Напряженное состояние подземного трубопровода определяется во многом его проектным положением. Существующие методики расчета подземного трубопровода не учитывают изменений этого положения в процессе строительства и эксплуатации [1]*.

Механическое воздействие грунтов на трубопроводы, нерасчетные перемещения их участков за счет динамики грунтов, температурные деформации, отклонения от проекта при строительстве и т.д. приводят к появлению изгибов (арок), не предусмотренных проектом.

Образование арок в подземном трубопроводе влечет появление дополнительных напряжений в металле, превышающих предельные нагрузки и, как следствие, повышает вероятность его разрушения и снижает ресурс работы [2—4].

Напряженно-деформированное состояние (НДС) упругоизогнутых участков подземных трубопроводов оценивают расчетными и экспериментальными методами, например, методами конечных элементов и фотоупругости [5, 6]. На участках, доступных для тензометрирования, рекомендуются посезонно измерять приращения напряжения для получения более полной информации об устойчивом положении трубы [1, 7, 8].

В результате изгиба в стенках стального трубопровода появляются чередующиеся области деформации растяжения и сжатия. Вследствие магнитоупругого эффекта [9] это приведет к перераспределению намагниченности ферромагнитного материала. В работе [10] показано, что больше всего ферромагнитная труба намагничивается в магнитном поле Земли в области максимальных изгибных деформаций. Таким образом, можно полагать, что вблизи максимального изгиба трубы будут иметь место два разнонаправленно намагниченных участка. Тогда на половине арки будут укладываться максимум и минимум его магнитогаммы. При этом пик тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности трубы должен соответствовать местам максимальных напряжений в ее стенке, а максимум нормальной составляющей напряженности магнитного поля трубы — смещен на четверть длины арки [11]. Поэтому величина измеряемого на поверхности трубы магнитного поля рассеяния является суммой (или разностью

СНиП 2.05.06-85 Магистральные трубопроводы. ВНИИСТ Миннефтегазстроя, 1997. 60 с.

ГОСТ Р 52330-2005. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования. Введ. 2005-09-01. М.: Стандартинформ, 2005. 14 с.

СТО Газпром 2-2.3-253-2009. Методика оценки технического состояния и целостности газопроводов. М.: Газпром экспо, 2009. 57 с.

СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. М.: Газпром, 2007. 51 с.

абсолютных значений) магнитных полей от растянутой и сжатой областей, что необходимо учитывать при калибровке физических параметров по механическим напряжениям.

Проведенные в работе [12] трехкратные исследования распределения магнитного поля рассеяния на внешней поверхности нескольких участков подземного газопровода (ГП) общей протяженностью ~ 2300 м и диаметром 1420 мм показали периодичность в распределении нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля рассеяния на поверхности ГП как по величине, так и по направлению.

Постановка цели и задач исследования. Цель настоящей работы — установить причины периодического знакопеременного распределения магнитного поля рассеяния вдоль поверхности подземного газопровода.

Ставились и решались следующие задачи:

- исследовать магнитное поле рассеяния трубопровода большого диаметра, не испытывающего внешних силовых воздействий со стороны грунта;
- изучить распределение магнитного поля рассеяния вдоль внешней поверхности протяженной трубы при ее намагничивании изнутри и отсутствии внешних силовых воздействий;
- измерить напряженность магнитного поля рассеяния на поверхности стальной трубы, испытывающей локальные изгибные деформации в магнитном поле Земли.

Исследовалось магнитное поле рассеяния надземной тепловой магистрали диаметром ~ 1200 мм, размещенной на стойках и поэтому не испытывающей внешних силовых воздействий со стороны грунта. Напряженно-деформированное состояние магистрали обусловлено, главным образом, термической деформацией, давлением, весом собственным и перекачиваемого продукта (воды). Распределение нормальной (H_n) составляющей магнитного поля рассеяния тепловой магистрали вдоль ее оси показано на рис. 1.

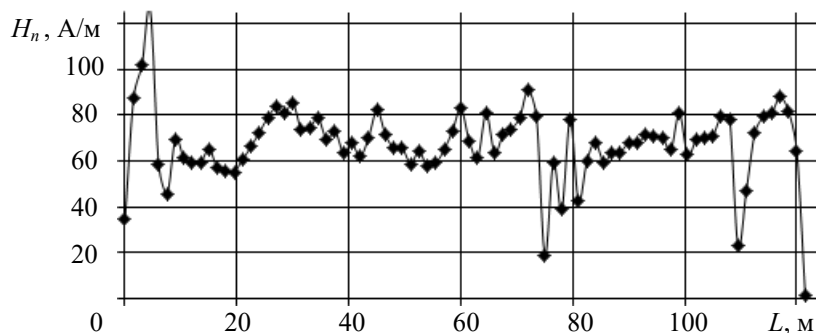


Рис. 1

Из рис. 1 видно, что изменяется только величина нормальной составляющей поля магистрали относительно значения 65—70 А/м, без смены ее знака (направления), со средним отклонением порядка ± 10 А/м. Величина магнитного поля Земли на момент проведения измерений на удалении 100 м от трубы равнялась ~ 30 А/м. Магнитное поле тепловой магистрали не имеет отрицательных аномалий, как на газопроводе [12].

Отсутствие периодичности изменения знака в распределении составляющих магнитного поля наземного трубопровода было также позднее установлено в работах авторов [13, 14]. Поэтому можно предположить, что периодические изменения величины и направления составляющих магнитного поля ГП [12] могут быть вызваны действием механических напряжений, обусловленных взаимодействием ГП и грунта.

Материалы и методы исследований. В ходе лабораторного исследования установлено периодическое изменение по величине и направлению магнитного поля рассеяния на поверхности стальной трубы с горизонтальной аркой.

Труба ($L \sim 13$ м, $D = 27$ мм) из стали Ст20, предварительно размагниченная в поле соленоида, была расположена на полу лаборатории под углом $15\text{—}20^\circ$ к вектору напряженности магнитного поля Земли ($H_{T0} \sim 30$ А/м). Нормальная составляющая (H_n) магнитного поля рас-

сеяния измерялась вдоль верхней образующей трубы с шагом 10 см с помощью феррозондового магнитометра ИКНМ-2ФП, а также горизонтальной составляющей (H_t) — с помощью магнитоизмерительного феррозондового прибора Ф-205.38. Труба локально деформировалась изгибом в упругой области со стрелой $h = 30$ мм (рис. 2), и повторно измерялись H_t и H_n в тех же точках ее верхней образующей. Изгибающая нагрузка снималась, следовал повторный изгиб этого участка трубы с той же стрелой прогиба, и далее выполнялись аналогичные измерения магнитного поля рассеяния.

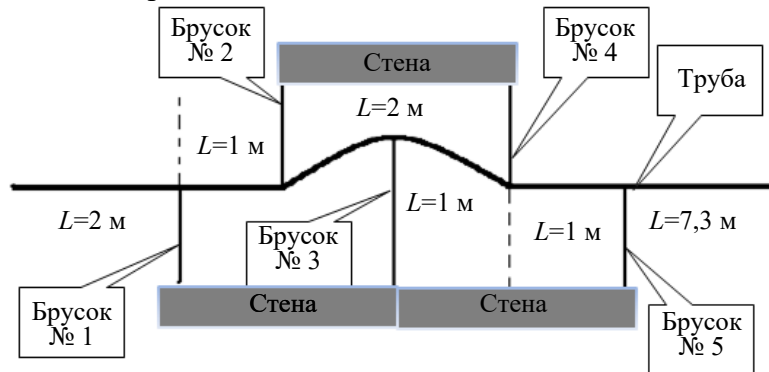


Рис. 2

Изгиб исследуемой трубы создавался с помощью пяти деревянных брусков, каждый из которых располагался упором в стену (на рис. 2 представлена схема создания арки в протяженной трубе, вид сверху). Брусок № 3 имел винтовой наконечник из немагнитного материала, позволяющий плавно механически увеличивать его длину и тем самым создавать изгибные деформации трубы. Максимальные расчетные продольные напряжения $\sigma_{пр}^{из}$ в стенках трубы, создаваемые ее изгибом [15], составили не более 180 МПа, что по уровню меньше допускаемых σ_p напряжений на растяжение для такой марки стали. При таком расположении исключалось влияние на напряженное состояние трубы ее собственного веса.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 3 показаны горизонтальная арка трубы и силовые линии ее магнитного поля рассеяния (а); нормальная H_n и тангенциальная H_t составляющие магнитного поля рассеяния верхней образующей трубы, изогнутой в магнитном поле Земли (б).

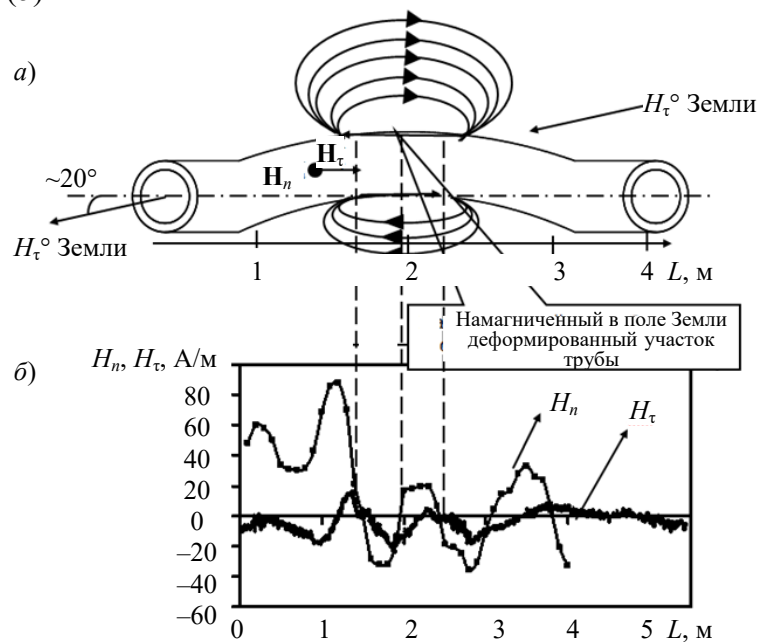


Рис. 3

На ненагруженных участках трубы (слева и справа от арки) наблюдаются небольшие, порядка ± 5 А/м, изменения поля рассеяния. На изогнутом участке трубы H_n и H_t периодически

ски изменяются по величине и направлению с амплитудой ~ 20 А/м и смещаются друг относительно друга примерно на 1 метр (половина длины арки). В вершине арки нормальная составляющая магнитного поля трубы равна нулю, а тангенциальная составляющая поля трубы приобретает отрицательное пиковое значение.

Установленное распределение магнитных полей рассеяния вдоль образующей трубы с локальным изгибом связано с появлением в ней магнитных диполей. Образование магнитных диполей объясняется тем, что при изгибе одна из образующих трубы испытывает деформацию растяжения, а диаметрально противоположная — деформацию сжатия. Как известно [16—18], при деформации во внешнем магнитном поле происходит неодинаковое намагничивание металла вдоль направления приложения растягивающих нагрузок и перпендикулярно прикладываемым сжимающим нагрузкам. При приложении напряжений, например сжимающих, к металлу магнитоупругое взаимодействие путем смещения или вращения доменных границ стремится повернуть векторы намагниченности в направлении, перпендикулярном направлению действующих напряжений. При этом доменные границы будут занимать новые метастабильные состояния с уже меньшей магнитоупругой энергией.

Изогнутая, как показано на рис. 3, а, труба имеет на боковых образующих чередующиеся области растяжения и сжатия. Причем они будут различаться по уровню нагрузки, испытываемой металлом, и на одной стороне эти области будут смещены на половину длины арки относительно областей с другой стороны. Очевидно, что вдоль боковой образующей изогнутой трубы при переходе от области растяжения к области сжатия происходит уменьшение растягивающих напряжений, затем смена знака и последующий рост сжимающих напряжений с максимумом в вершине изгиба. Таким образом, вдоль образующей трубы между областью растяжения и сжатия должно появляться следующее распределение ее намагниченности: в области вершины арки, где растягивающие напряжения максимальны, намагниченность наибольшая; при удалении от вершины напряжения убывают, что вызывает уменьшение намагниченности металла. В некоторой точке между областью растяжения и сжатия происходят смена знака напряжений и соответствующее изменение магнитного поля рассеяния трубы (направления намагниченности). По мере приближения к точке с максимальной сжимающей нагрузкой происходит неравномерное увеличение намагниченности металла со сменой знака. При движении датчика феррозондового магнитометра с осью, ориентированной, например на измерение тангенциальной составляющей магнитного поля, вдоль оси трубы с аркой, будет наблюдаться периодическое изменение измеряемой величины с максимумом в вершине изгиба. Максимум измеряемой нормальной составляющей должен находиться на некотором удалении от вершины изгиба, на участке выхода силовых линий, в точке, где, возможно, будет граница нагруженной области металла трубы. И действительно, как видно из рис. 3, б, в точке, где находится брусок № 3, тангенциальная составляющая принимает максимальное значение, а нормальная составляющая обращается в нуль. Таким образом „длина волны“ периодического изменения нормальной и тангенциальной составляющих магнитного поля рассеяния подземного трубопровода может быть соизмерима с протяженностью образованной в нем арки. По месту нахождения экстремумов этих величин можно определять координаты участков подземного трубопровода, где возможны его наибольшие изгибные деформации.

Авторами [11, 14] также был установлен периодический характер изменения трех ортогональных компонентов магнитного поля наземного и надземного подвешенного на деревянных опорах газопровода. В работе [13] установлено, что магнитное поле системы постоянных магнитов, представляющих собой модель трубопровода, изменяется периодически как по модулю, так и по направлению, и имеет схожий характер с магнитным полем подземного трубопровода, испытывающего изгибные деформации [12].

Результаты выполненных исследований магнитного поля рассеяния изогнутой трубы показывают, что сезонные изменения величины и направления напряженности магнитного поля подземного ГП [12] могут быть вызваны его изгибными деформациями.

Исследование магнитного поля рассеяния подземных трубопроводов позволит определять его истинные сезонные положения в грунте, а также участки с более интенсивным износом изоляционного покрытия, вызванным перемещением трубопровода в грунте.

Сочетание расчетного и приборного методов исследования напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, в том числе в зонах арочных образований, позволит повысить качество прогнозирования их остаточного ресурса.

Выводы. В настоящей работе:

1) показано, что геометрия арки, созданной на протяженной трубе в лабораторных условиях, соизмерима с „длиной волны“ периодического распределения напряженности магнитного поля рассеяния вдоль ее поверхности;

2) установлено, что знакопеременные напряжения, возникающие в стенке упругоизогнутого в виде арки участка подземного газопровода, являются причиной его неравномерного и неоднородного намагничивания в магнитном поле Земли, а следовательно, и периодического знакопеременного изменения магнитного поля рассеяния, измеряемого на его поверхности;

3) предложено использовать магнитограммы полей рассеяния подземных трубопроводов для установления границ образования арок и оценивать максимальные напряжения изгиба в них, а также прогнозировать появление участков с высоким уровнем стресс-коррозионных разрушений;

4) изменение напряженности магнитного поля рассеяния подземного трубопровода в вершинах арок может служить метрологическим параметром при контроле максимальных напряжений, испытываемых им в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харионовский В. В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 467 с.
2. Кузнецов А. Н. Исследование влияния изгибов трубопроводов на их долговечность // Газовая промышленность. 2012. № 2. С. 59—61.
3. Мирошниченко Б. И. Роль напряженного состояния в формировании дефектов стресс-коррозии в трубопроводах // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 42—51.
4. Кушнир С. Я., Новосёлов В. В., Иванов И. А. Исследование влияния радиуса изгиба трубопровода на скорость коррозии его стенки // Нефть и газ. 2001. № 2. С. 91—95.
5. Вагнер В. В. Распределение стрелы прогиба арочного выброса по длине подземного газопровода // Изв. вузов. Нефть и газ. 2008. № 4. С. 101—105.
6. Рыжков В. М., Рыжков Е. В. Определение распределенной нагрузки на криволинейных участках трубопроводов, обусловленной внутренним давлением в трубе // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2013. № 2-1(30). С. 218—222.
7. Контроль напряженно-деформированного состояния потенциально опасных участков трубопроводов // Газовая промышленность. 2009. № 7. С. 90—92.
8. Бахтигареев А. А., Мустафин Ф. М. Исследование напряженно-деформированного состояния упругоизогнутого участка трубопровода и повышение эксплуатационной надежности данного участка при неблагоприятных периодах эксплуатации // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. № 2. С. 18—22.
9. Новиков В. Ф., Бахарев М. С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. Тюмень: Вектор Бук, 2001. 220 с.
10. Кулеев В. Г., Атангулова Л. В., Лопатин В. В. Экспериментальное изучение полей рассеяния упруго- и пластически изогнутых стальных труб в поле Земли // Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 48—61.

11. Крapiвский Е. И., Некучаев В. О. Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов. Ухта: УГТУ, 2011. 142 с.
12. Бахареv М. С., Мосягин М. Н., Иванов И. А., Новиков В. Ф., Кулак С. М. О возможности использования магнитных полей рассеяния магистрального газопровода для выявления сезонной динамики механических напряжений // Нефть и газ. 2004. № 4. С. 53—59.
13. Любчик А. Н. Повышение эффективности магнитометрического метода дистанционного контроля технического состояния подземных магистральных трубопроводов: Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2014. 151 с.
14. Венкова Ю. А. Мониторинг технического состояния нефтегазопроводов по индуцированной и остаточной намагниченности: Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2016. 149 с.
15. Рудаченко А. В., Саруев А. Л. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учеб. пос. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 136 с.
16. Кокорин Н. В. Контроль напряженного состояния нефтепромысловых труб. М.: Недра, 1980. 111 с.
17. Акулов Н. С. Ферромагнетизм. М.: Госиздат, 1939. 188 с.
18. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. М.—Л.: Гостехиздат, 1948. 816 с.

Сведения об авторах

- Сергей Михайлович Кулак** — канд. техн. наук, доцент; Тюменский индустриальный университет, кафедра физики и приборостроения; E-mail: kulaksm@tyuiu.ru
- Денис Фёдорович Нерадовский** — Тюменский государственный университет, физико-технический институт, кафедра моделирования физических процессов и систем; старший преподаватель; E-mail: denner81@mail.ru
- Владимир Викторович Проботюк** — канд. техн. наук; Тюменский индустриальный университет, кафедра физики и приборостроения; E-mail: probotjukvv@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 29.10.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Kharionovskiy V.V. *Nadezhnost' i resurs konstruksiy gazoprovodov* (Reliability and Service Life of Gas Pipeline Structures), Moscow, 2000, 467 p. (in Russ.)
2. Kuznetsov A.N. *Gazovaya promyshlennost'*, 2012, no. 2, pp. 59–61. (in Russ.)
3. Miroshnichenko B.I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, no. 6(44), pp. 403–408.
4. Kushnir S.Ya., Novoselov V.V., Ivanov I.A. *Neft' i gaz*, 2001, no. 2, pp. 91–95. (in Russ.)
5. Vagner V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, 2008, no. 4, pp. 101–105. (in Russ.)
6. Ryzhkov V.M., Ryzhkov E.V. *Izvestiya nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye*, 2013, no. 2-1(30), pp. 218–222. (in Russ.)
7. *Gazovaya promyshlennost'*, 2009, no. 7, pp. 90–92. (in Russ.)
8. Bakhtigareev A.A., Mustafin F.M. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* (Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbon Raw Materials), 2012, no. 2, pp. 18–22. (in Russ.)
9. Novikov V.F., Bakharev M.S. *Magnitnaya diagnostika mekhanicheskikh napryazheniy v ferromagnetikakh* (Magnetic Diagnostics of Mechanical Stresses in Ferromagnets), Tyumen, 2001, 220 p. (in Russ.)
10. Kuleev V.G., Atagulova L.V., Lopatin V.V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2002, no. 10(38), pp. 755–766.
11. Krapivsky E.I., Nekuchaev V.O. *Distsionnaya magnitometriya gazonefteprovodov* (Remote Magnetometry of Gas and Oil Pipelines), Ukhta, 2011, 142 p. (in Russ.)
12. Bakharev M.S., Mosyagin M.N., Ivanov I.A., Novikov V.F., Kulak S.M. *Neft' i gaz*, 2004, no. 4, pp. 53–59. (in Russ.)
13. Lyubchik A.N. *Povysheniye effektivnosti magnitometricheskogo metoda distantsionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya podzemnykh magistral'nykh truboprovodov* (Increasing the Efficiency of the Magnetometric Method for Remote Monitoring of the Technical Condition of Underground Main Pipelines), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2014, 151 p. (in Russ.)
14. Venkova Yu.A. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya neftegazoprovodov po indutsirovannoy i ostatochnoy namagnichennosti* (Monitoring the Technical Condition of Oil and Gas Pipelines by Induced and Residual Magnetization), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2016, 149 p. (in Russ.)
15. Rudachenko A.V., Saruyev A.L. *Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov* (Study of the Stress-Strain State of Pipelines), Tomsk, 2011, 136 p. (in Russ.)
16. Kokorin N.V. *Kontrol' napryazhennogo sostoyaniya neftepromyslovykh trub* (Monitoring the Stress State of Oil Field Pipes), Moscow, 1980, 111 p. (in Russ.)
17. Akulov N.S. *Ferromagnetizm* (Ferromagnetism), Moscow, 1939, 188 p. (in Russ.)
18. Vonsovsky S.V., Shur Ya.S. *Ferromagnetizm* (Ferromagnetism), Moscow, Leningrad, 1948, 816 p. (in Russ.)

Data on authors

- Sergey M. Kulak** — PhD, Associate Professor; Industrial University of Tyumen, Department of Physics and Instrumentation; E-mail: kulaksm@tyuiu.ru
- Denis F. Neradovsky** — Tyumen State University, Institute of Physics and Technology, Department of Modeling of Physical Processes and Systems; Senior Lecturer; E-mail: denner81@mail.ru
- Vladimir V. Probotyuk** — PhD; Industrial University of Tyumen, Department of Physics and Instrumentation; E-mail: probotjukvv@tyuiu.ru

Received 04.10.2023; approved after reviewing 29.10.2023; accepted for publication 17.12.2023.

**ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СРЕДАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ
ПРИ УСЛОВИИ ЖЕСТКОГО КОНТАКТА**

А. В. ВАГИН*, А. С. ВОРОТЫНЦЕВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, Россия
av.vagin@bk.ru

Аннотация. Исследовано распространение волны Лява по цилиндрическим поверхностям слоистых сред (параллельно слоям) с однородными граничными условиями. В рамках исследования получено и решено относительно волнового числа дисперсионное уравнение. По полученным решениям построены графические зависимости скорости распространения волны от частоты ультразвука, показано влияние радиуса кривизны поверхности на скорость волны.

Ключевые слова: волна Лява, дисперсионное уравнение, слоистая среда, цилиндрическая поверхность, однородные граничные условия

Ссылка для цитирования: Вагин А. В., Воротынцева А. С. Волновые процессы в средах с цилиндрическими поверхностями при условии жесткого контакта // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 186—194. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-186-194.

WAVE PROCESSES IN MEDIA WITH CYLINDRICAL SURFACES UNDER RIGID CONTACT

A. V. Vagin*, A. S. Vorotyntseva

*St. Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia
av.vagin@bk.ru

Abstract. Love wave propagation in layered media parallel to the layers of the structure along the cylindrical surfaces with homogeneous boundary conditions is investigated. As part of the study, a dispersion equation was obtained and solved with respect to the wave number. Based on the obtained solutions, graphical dependences of the wave propagation velocity on the ultrasound frequency are plotted, and the influence of the surface curvature radius on the wave velocity is shown.

Keywords: Love wave, dispersion equation, layered medium, cylindrical surface, homogeneous boundary conditions

For citation: Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Wave processes in media with cylindrical surfaces under rigid contact. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 186—194 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-186-194.

Введение. Потребность в создании и конструировании новых материалов с наилучшими физико-механическими характеристиками обуславливает необходимость разработки новых технологий производства изделий для их контроля. Одной из перспективных разработок в области создания структур являются цилиндрические слоистые среды. Приближение цилиндрических слоистых сред широко используется в разнообразных прикладных задачах, применительно к геоакустике [1, 2], к условиям неразрушающего контроля, структуроскопии [3].

Первые исследования слоистых сред начались с изучения структур горных пород методом акустогеологического исследования. Как показано в статье [4], первые упоминания об исследованиях в этом направлении приходятся на 1930-е гг. — тогда впервые были выявлены анизотропные свойства осадочных пород [5—8]. По данным об анизотропии продольных и поперечных волн в период 1940—1950 гг. в тонкослоистых средах были проведены исследования анизотропных свойств, по результатам которых теоретически описано явление анизо-

тропии, что впоследствии подтверждено экспериментально [9, 10]. В 1960—1980 гг. была наиболее подробно изучена анизотропия тонкослоистых сред [11, 12], а также разработана эффективная анизотропная модель трещиноватой среды [13, 14], представлены основы теории распространения упругих волн в таких системах [15—17] и соответствующие численные методы и алгоритмы [18—21] для их оценки.

Слоистые среды перспективны для создания материалов с хорошими физико-механическими характеристиками, что основывается на развитии соответствующей контрольно-измерительной аппаратуры. Так как распространение волн на криволинейных поверхностях представляет практический интерес, такая задача имеет значение для современной науки и техники. Большинство криволинейных поверхностей на практике можно аппроксимировать для получения примерного решения задачи под цилиндрическую или сферическую поверхность — так, множество работ, к примеру [22—24], посвящено именно поверхностным волнам, распространяющимся по цилиндрической поверхности.

Задачей настоящей работы является исследование распространения волн Лява: необходимо показать влияние частоты ультразвука и кривизны поверхности на абсолютные значения фазовых скоростей используемых для контроля волн, взаимодействующих в приближении жесткого контакта слоев.

Исследование волн Лява представляет научный интерес, поскольку волны этого типа широко применяются в неразрушающем контроле поверхностных дефектов различных структур. Волны Лява являются частным случаем поверхностных волн, часто применяются для контроля качества поверхностей материалов, также при исследованиях в многослойных средах за счет использования волн такого типа представляется возможным выявлять физико-механические характеристики отдельных слоев [25, 26]. Помимо прочего, необходимо отметить, что волны Лява используются и в сейсмоакустике — в [27] показано, что такие волны имеют большое значение при преобразовании сейсмической энергии во время землетрясений. Таким образом, широкий спектр задач, решаемых с помощью волн Лява, определяет актуальность настоящего исследования.

Описание распространения волн Лява на цилиндрических поверхностях. В рамках поставленной задачи рассматривается цилиндрическая поверхность (рис. 1), состоящая из слоя стали и слоя графита. Радиус кривизны цилиндрической поверхности от центра до верхней границы слоя стали составляет $R_2 = 110$ мм, до границы раздела двух сред — $R_1 = 100$ мм, до нижней границы слоя графита — $R_0 = 90$ мм. Известны также данные для этих сред — плотности и параметры Лямэ: ρ_1, λ_1, μ_1 — для слоя графита; ρ_2, λ_2, μ_2 — для слоя стали.

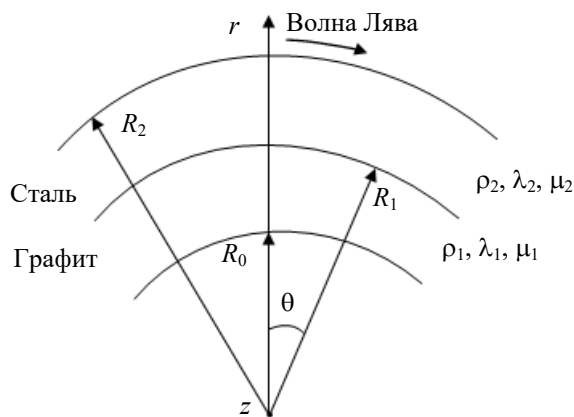


Рис. 1

Известно [28], что волна Лява является поперечной с горизонтальной поляризацией, следовательно, уравнение движения для нее будет иметь вид:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_t}{\partial t^2} - \mu \Delta \xi_t = 0,$$

где ρ — плотность среды, ξ_t — вектор поперечного смещения частиц, μ — модуль сдвига, $\Delta \xi_t = \text{grad}(\text{div}(\xi_t))$.

Поскольку рассматривается распространение волн на криволинейной поверхности, дальнейшее описание целесообразно представить в цилиндрической системе координат (r, θ, z) . Также для определенности примем, что ось цилиндрической поверхности соответствует оси координат z , учитывается параллельное слоям, т.е. по азимутальной координате θ , распространение волны Лява. Поскольку при такой постановке задачи у поперечных волн единственным ненулевым компонентом смещения является компонент, параллельный образующей цилиндра ξ_z , то уравнение движения запишется следующим образом:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_z}{\partial t^2} = \mu \Delta \xi_z = \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \xi_z,$$

где $\Delta \xi_z = \text{grad}(\text{div}(\xi_z))$, r, θ — параметры системы координат.

В [28] показано, что в случае распространения волн на цилиндрических поверхностях решение уравнения движения, согласно теории упругости, должно соответствовать следующим условиям:

- отсутствие напряжений на цилиндрической поверхности;
- соответствие принципу погашаемости [29];
- зависимость от азимутальной координаты θ по экспоненциальному закону $e^{\pm ip\theta}$, где i — мнимая единица, p — угловое волновое число;
- переход в рэлеевскую волну, распространяющуюся вдоль плоской границы упругого полупространства с вакуумом при стремлении радиуса кривизны цилиндра R к бесконечности и конечном соотношении p/R .

Тогда для определения параметра упругого смещения необходимо решить представленное уравнение движения, которое находится в форме [28]:

$$\xi_z = \xi_z(r) e^{i(p\theta - \omega t)},$$

где ω — частота, t — время.

Как показано в [30], компоненты смещения в двух средах соответствуют уравнениям Гельмгольца в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + k_t^2 \psi = 0,$$

где ψ — векторный потенциал, k_t^2 — квадрат волнового числа.

Известно [31], что одним из фундаментальных способов решения таких уравнений является использование семейства функций Бесселя. Для определенности и удобства изложения принято, что компоненты смещения в слое графита (нижнем слое) будут обозначаться как ξ_{1z} , в слое стали (верхнем слое) — соответственно ξ_{2z} . Тогда компоненты смещения в двух средах определяются следующим образом:

$$\xi_{1z} = A J_p(k_{1t} r) e^{ip\theta} \quad \text{при } r < R_1, \quad (1)$$

$$\xi_{2z} = [B J_p(k_{2t} r) + C N_p(k_{2t} r)] e^{ip\theta} \quad \text{при } R_1 < r < R_2, \quad (2)$$

где A, B, C — неопределенные константы, $k_{1,2t} = \sqrt{\frac{\rho_{1,2}\omega^2}{\mu_{1,2}}}$ — волновое число для каждой среды, $J_p(k_{1,2t}r)$ — функция Бесселя порядка p , $N_p(k_{2t}r)$ — функция Неймана порядка p , θ_z рассматриваемая в бесконечном интервале $-\infty < \theta < +\infty$.

Также необходимо установить еще один важный параметр — компонент механических напряжений, который определяется по обобщенному закону Гука как линейная функция, связывающая тензор деформаций и тензор напряжений [32]. Для поставленной задачи определено, что компонент механических напряжений σ_z представляется выражениями:

$$\sigma_{1z} = \mu_1 \frac{\partial \xi_{1z}}{\partial r}, \quad (3)$$

$$\sigma_{2z} = \mu_2 \frac{\partial \xi_{2z}}{\partial r}. \quad (4)$$

Распространение волн Лява в однородных средах. Для дальнейшего вывода дисперсионного уравнения необходимо определить выражения граничных условий для однородной системы „твердая среда—упругое полупространство“, которые представлены ниже.

Первое граничное условие определяется равенством механических напряжений на границе раздела системы „твердая среда—упругое полупространство“:

$$\sigma_{1z} = \sigma_{2z} \text{ при } r = R_1. \quad (5)$$

Второе граничное условие заключается в равенстве нулю компонентов механических напряжений на верхней границе второго слоя:

$$\sigma_{2z} = 0 \text{ при } r = R_2. \quad (6)$$

Третье граничное условие определяет равенство компонентов упругих смещений на границе раздела двух сред:

$$\xi_{1z} = \xi_{2z} \text{ при } r = R_1. \quad (7)$$

С целью определения дисперсионного уравнения для волны Лява, распространяющейся по цилиндрической поверхности в слоистой среде, необходимо подставить выражения для упругих смещений и механических напряжений (1)—(4) в соотношения для граничных условий (5)—(7). При выполнении подстановки сформируется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \mu_1 \frac{\partial \xi_{1z}}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \mu_2 \frac{\partial \xi_{2z}}{\partial r} \Big|_{r=R_1}, \\ \frac{\partial \xi_{2z}}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = 0, \\ \xi_{1z} \Big|_{r=R_1} = \xi_{2z} \Big|_{r=R_1}. \end{cases}$$

В эту систему уравнений подставляются известные компоненты упругих смещений (1), (2):

$$\begin{cases} \mu_1 A J'_p(k_{1t}R_1) - \mu_2 [B J'_p(k_{2t}R_2) + C N'_p(k_{2t}R_2)] = 0, \\ B J'_p(k_{2t}R_2) + C N'_p(k_{2t}R_2) = 0, \\ A J_p(k_{1t}R_1) - B J_p(k_{2t}R_1) - C N_p(k_{2t}R_1) = 0, \end{cases}$$

где $J'_p(x) = \frac{dJ_p(x)}{dx}$, $N'_p(x) = \frac{dN_p(x)}{dx}$ при $x = k_{1,2t}R_{1,2}$.

Далее, воспользовавшись вышеприведенной системой уравнений, требуется составить детерминант и приравнять его к нулю:

$$\begin{vmatrix} \mu_1 J'_p(k_{1t}R_1) & -\mu_2 J'_p(k_{2t}R_2) & N'_p(k_{2t}R_2) \\ 0 & J'_p(k_{2t}R_2) & N'_p(k_{2t}R_2) \\ J_p(k_{1t}R_1) & -J_p(k_{2t}R_1) & -N_p(k_{2t}R_1) \end{vmatrix} = 0.$$

После решения детерминанта и ряда нескольких преобразований получим дисперсионное уравнение для рассматриваемой задачи [33]:

$$\begin{aligned} & \frac{J'_p(k_{1t}R_1)}{J_p(k_{1t}R_1)} = \frac{\mu_2 k_{2t}}{\mu_1 k_{1t}} \times \\ & \times \frac{J'_p(k_{2t}R_1)N'_p[k_{2t}(R_1+h)] - J'_p[k_{2t}(R_1+h)]N'_p(k_{2t}R_1)}{J_p(k_{2t}R_1)N'_p[k_{2t}(R_1+h)] - J_p[k_{2t}(R_1+h)]N_p(k_{2t}R_1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $h = R_2 - R_1$ — толщина второго слоя.

Поскольку дисперсионное уравнение (8) содержит неэлементарные функции Бесселя и Неймана, такое уравнение является трансцендентным и имеет множество решений. Найденные корни уравнения определяются параметром p , связь которого с величиной волновых чисел k_t при определенном радиусе R устанавливает уравнение (8). Для дальнейшего упрощения рассмотрения и анализа уравнения будет учтено условие малости толщины верхнего слоя среды, т.е. $hk_{2t} \ll 1$, а также применены правила дифференцирования бесселевых функций [34]:

$$\frac{d}{dx} J_p(x) = -J_{p+1}(x) + \frac{pJ_p(x)}{x}, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dx} J_p(x) = J_{p-1}(x) - \frac{pJ_p(x)}{x}. \quad (10)$$

Аналогичные правила (9), (10) справедливы и для функций Неймана, которые являются частным случаем функции Бесселя определенного порядка.

Тогда, принимая во внимание условие малости толщины верхнего слоя и выражения (9) и (10), дисперсионное уравнение (8) преобразуем к следующему упрощенному виду:

$$\frac{J'_p(k_{1t}R_1)}{J_p(k_{1t}R_1)} = -\frac{h}{R_1} \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{p^2 - (k_{2t}R_1)^2}{k_{1t}R_1}. \quad (11)$$

Руководствуясь допущением, что соотношение для волновых чисел сред соответствует случаю плоскопараллельной границы, т.е. $k_{2t} > k > k_{1t}$, скорости распространения волны в средах будут соотноситься как $c_{1t} > c > c_{2t}$, т.е. нижний слой структуры является замедляющим и понижает скорость распространения волны.

Для дальнейшего рассмотрения зависимости скорости распространения волны Лява от частоты и соответствующих графических построений оценим диапазон частот. Как показано в [30], существует некоторое условие ограничения по частоте $\omega > \omega_{\text{пр}}$, где $\omega_{\text{пр}}$ — предельная частота:

$$\left. \frac{J'_p(k_{1t}R_1)}{J_p(k_{1t}R_1)} \right|_{k_{1t}R_1=p} < \frac{J'_p(k_{1t}R_1)}{J_p(k_{1t}R_1)}, \quad (12)$$

где обозначение $k_{1t}R_1 = p$ соответствует предельной частоте $\omega_{\text{пр}} : \left[k_{1t}R_1 \right]_{\text{пр}} = \frac{\omega_{\text{пр}}}{c_{1t}} R_1$, $c_t^{(1)}$ — скорость поперечной волны. При использовании асимптотического представления и упрощения дисперсионного уравнения (11) по материалам работ [30, 34] в виде:

$$\frac{J'_p(k_{1t}R_1)}{J_p(k_{1t}R_1)} \approx \sqrt{\frac{p^2}{(k_{1t}R_1)^2} - 1} - \frac{1}{2(k_{1t}R_1)} \text{ при } p > k_{1t}R_1 \gg 1, \quad (13)$$

а также выполнении подстановки предельных значений в данное выражение, условие ограничения частотного диапазона запишем следующим образом:

$$\omega_{\text{пр}} \propto \left(\frac{c_{1t}}{R_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu_1 c_{2t}}{\mu_2 c_{1t}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{c_{2t}}{R_2 - R_1} \right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \frac{(c_{2t})^2}{(c_{1t})^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (14)$$

Выполнив расчет по данному выражению, получим значение предельной частоты: $\omega_{\text{пр}} \approx 379,8 - 657,9i$ Гц.

Анализ выражения (14) показывает, что при стремлении скорости поперечных волн в первом слое к скорости во втором слое $c_{1t} \rightarrow c_{2t}$, или при равенстве нулю толщины второго слоя ($h = 0$), волны Лява на цилиндрической поверхности не распространяются. Согласно (14), условие ограничения частотного диапазона связано с ограничением глубины проникновения волны в зависимости от толщины верхнего слоя h : при стремлении этого параметра к нулю возрастает глубина проникновения волны, вследствие чего на линии разветвления бесконечного порядка $r = 0$ появляется смещение, что, в свою очередь, препятствует установлению волнового процесса в среде. Если рассматривать случай „развертывания“ цилиндрической поверхности в плоскость, т.е. устремления радиуса кривизны в бесконечность ($R_1 \rightarrow \infty$), волны Лява могут распространяться в пределах всего частотного диапазона [30].

Для построения графической зависимости скорости распространения волны Лява от частоты ультразвука используется упрощенный вид дисперсионного уравнения, записанного в форме (11). Графические построения выполняются в диапазоне частот $\omega = 0 - 1$ МГц (рис. 2; кривая 1 соответствует радиусу кривизны цилиндрической поверхности $R = 130$, 2 — 110, 3 — 80 мм).

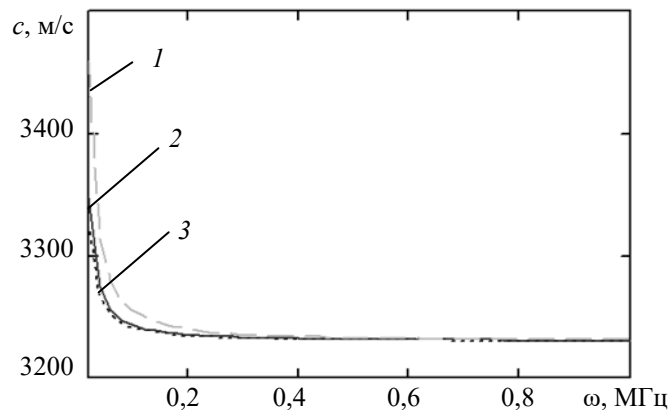


Рис. 2

Проанализировав рис. 2, стоит отметить убывающий характер зависимости скорости распространения волны Лява от увеличения частоты. Также следует отметить влияние радиуса кривизны поверхности на скорость распространения волны — из представленных графиков видно, что при уменьшении радиуса скорость распространения волны в слоях значительно падает.

Заключение. Отметим, что в статье показано влияние на абсолютное значение скорости волны Лява таких параметров однородной цилиндрической среды, как радиус кривизны поверхности.

Представлены отличия акустических свойств цилиндрических слоистых сред от свойств плоскопараллельных сред. Получено дисперсионное уравнение для волны Лява, распространяющейся параллельно слоям структуры на цилиндрической поверхности с однородными граничными условиями. Стоит отметить, что параметром, влияющим на фазовую скорость волны, является не только радиус кривизны цилиндрической поверхности, но и наличие дополнительных промежуточных слоев.

При увеличении частоты скорость распространения волны Лява плавно понижается, кроме того, существенное влияние на скорость волны вносит параметр кривизны цилиндрической поверхности, что подтверждается построенными графическими зависимостями скорости волны Лява от частоты для трех случаев радиуса кривизны — 80, 110 и 130 мм.

Полученные зависимости используются применительно к задачам нахождения основных физико-механических характеристик материала на основе акустических измерений, а также в качестве основного материала для проведения предызмерительных изысканий с целью получения максимального объема информации без применения средств ультразвукового контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямщиков В. С., Бауков Ю. И. Упругие волны в неоднородном массиве // Геоакустика. М.: Изд-во МГИ, 1973. 256 с.
2. Горбачевич Ф. Ф. Отражение и преломление упругих волн на границе раздела сред. Апатиты: Кольский филиал РАН, 1985.
3. Панасюк О. Н. Анализ влияния граничных условий на распространение волн в слоистых композитных материалах // Прикладная механика. 2014. № 4. С. 52—58.
4. Оболенцева И. Р., Чичина Т. И. 50 лет исследований сейсмической анизотропии в России // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 10. С. 1452—1470.
5. McCollum B., Snell F. A. Asymmetry of sound velocity in stratified formations // Physics. 1932. Vol. 2, N 3. P. 174.
6. Weatherby B. B., Born W. T., Harding R. L. Granite and limestone velocity determinations in Arbuckle Mountains, Oklahoma // Bull. AAPG. 1934. Vol. 18. P. 106—118.
7. Pirson S. J. The correlation method of seismographing for oil // Oil Weekly. 1937. Vol. 87, N 2. P. 24—44.
8. Beers R. F. Velocity stratification as an aid to correlation // Geophysics. 1940. Vol. 5, N 1. P. 15—21.
9. Тархов А. Г. К вопросу об анизотропии упругих свойств горных пород // Материалы ВСЕГЕИ. Общая серия. Сборник № 5. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1940. С. 209—222.
10. Ризниченко Ю. В. О сейсмической квазианизотропии // Изв. АН СССР. Серия географ. и геофиз. 1949. № 6. С. 518—543.
11. Ляховицкий Ф. М., Невский М. В. Анализ анизотропии скоростей сейсмических волн в тонкослоистых периодических средах // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. № 9. С. 12—21.
12. Сибиряков Б. П., Максимов Л. А., Татарников М. А. Анизотропия и дисперсия упругих волн в слоистых периодических структурах. Новосибирск: Наука, 1980. 73 с.

13. Клем-Мусатов К. Д., Оболенцева И. Р., Айзенберг А. М. Расчет полей упругих волн для одной модели анизотропной среды // Динамические характеристики сейсмических волн. Новосибирск: Наука, 1973. С. 73—98.
14. Айзенберг А. М., Клем-Мусатов К. Д., Ланда Е. И. Модель анизотропной сейсмической среды // Сейсмические волны в сложнопостроенных средах. Новосибирск: Наука, 1974. С. 64—110.
15. Федоров Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука, 1965. 386 с.
16. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 639 с.
17. Петрашень Г. И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.
18. Мартынов В. Н., Михайленко Б. Г. Численное моделирование распространения упругих волн в анизотропных неоднородных средах для полупространства и сферы // Математические методы интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск: Вычислительный центр СО РАН, 1979. С. 85—114.
19. Бабич В. М. Лучевой метод вычисления интенсивности волновых фронтов в случае упругой неоднородной анизотропной среды // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Наука, 1961. Вып. 5. С. 36—46.
20. Оболенцева И. Р., Гречка В. Ю. Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы). Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1989. 225 с.
21. Бродов Л. Ю., Ковтун А. А., Тихонов А. А. Некоторые результаты численного моделирования для поперечно-изотропной среды // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 11. С. 48—57.
22. Авилова Г. М., Рыбак С. А. Нормальные волны в слоистых цилиндрических оболочках // Акустический журн. 1979. Т. 25, № 1. С. 18—22.
23. Белубекян М. В., Овсепян В. В. Задача типа Лява для цилиндрической полости // Акустический журн. 1993. Т. 39, № 2. С. 370—373.
24. Пятаков П. А. Возбуждение волн Лява, распространяющихся по цилиндрической поверхности // Акустический журн. 1980. Т. 26, № 2. С. 237—241.
25. Капцов А. В., Кузнецов С. В. Волны Лява в трехслойном упругом полупространстве // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79, № 4. С. 550—557.
26. Ильяшенко А. В., Кузнецов С. В. Теоретические аспекты применения волн Лява и SH-волн в неразрушающей диагностике слоистых сред // Дефектоскопия. 2017. № 9. С. 3—9.
27. Рашидов Т. Р., Кузнецов С. В., Мардонов Б. М., Мирзаев И. Прикладные задачи сейсмодинамики сооружений. Кн. 1. Действие сейсмических волн на подземный трубопровод и фундаменты сооружений, взаимодействующих с грунтовой средой. Ташкент: Navro'z, 2019. 268 с.
28. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
29. Малюжинец Г. Д. Математическая формулировка задачи о вынужденных гармонических колебаниях в произвольной области // ДАН СССР. 1951. Т. 78, № 3. С. 439—442.
30. Шевяхов Н. С. О волнах Лява на поверхности цилиндра, покрытого слоем // Акустический журн. 1977. Т. 23, № 1. С. 155—157.
31. Владимиров В. С., Жаринов В. В. Уравнения математической физики. М.: Физматлит, 2004.
32. Ляв А. Математическая теория упругости. М.; Л.: ОНТИ, 1935. 674 с.
33. Гуляев Ю. В., Ползикова Н. И. Сдвиговые поверхностные акустические волны на цилиндрической поверхности твердого тела, покрытой слоем инородного материала // Акустический журн. 1978. Т. 24, № 4. С. 504—507.
34. Корнев Б. Г. Введение в теорию бесселевых функций. М.: Наука, 1971.

Сведения об авторах

- Антон Владимирович Вагин** — аспирант; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра электроакустики и ультразвуковой техники, ассистент; E-mail: av.vagin@bk.ru
- Алена Сергеевна Воротынцева** — магистрант; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра электроакустики и ультразвуковой техники; E-mail: avorotynceva@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.08.2023; одобрена после рецензирования 03.11.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Yamshchikov V.S., Baukov Yu.I. *Uprugiye volny v neodnorodnom massive. Geoakustika* (Elastic Waves in an Inhomogeneous Mass in Geoacoustics), Moscow, 1973, pp. 256. (in Russ.)
2. Gorbachev F.F. *Otazheniye i prelomleniye uprugikh voln na granitse razdela sred* (Reflection and Refraction of Elastic Waves at the Interface between Media), Apatity, 1985. (in Russ.)
3. Panasyuk O.N. *International Applied Mechanics*, 2014, no. 4(50), pp. 399–405.
4. Obolentseva I.R., Chichinina T.I. *Geologiya i geofizika*, 2010, no. 10(51), pp. 1452–1470. (in Russ.)
5. McCollum B., Snell F.A. *Physics*, 1932, no. 3(2), pp. 174.
6. Weatherby B.B., Born W.T., Harding R.L. *Bull. AAPG*, 1934, vol. 18, pp. 106–118.
7. Pirson S.J. *Oil Weekly*, 1937, no. 2(87), pp. 24–44.
8. Beers R.F. *Geophysics*, 1940, no. 1(5), pp. 15–21.
9. Tarkhov A.G. *Materialy VSEGEI. Obshchaya seriya, sbornik № 5* (VSEGEI Materials. General Series, Collection No. 5), Moscow, Leningrad, 1940, pp. 209–222. (in Russ.)
10. Riznichenko Yu.V. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geografiya i geofizika*, 1949, no. 6, pp. 518–543. (in Russ.)
11. Lyakhovitskiy F.M., Nevskiy M.V. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, 1970, no. 9, pp. 12–21. (in Russ.)
12. Sibiryakov B.P., Maksimov L.A., Tatarnikov M.A. *Anizotropiya i dispersiya uprugikh voln v sloistyykh periodicheskikh strukturakh* (Anisotropy and Dispersion of Elastic Waves in Layered Periodic Structures) Novosibirsk, 1980, 73 p. (in Russ.)
13. Klem-Musatov K.D., Obolentseva I.R., Ayzenberg A.M. *Dinamicheskiye kharakteristiki seysmicheskikh voln* (Dynamic Characteristics of Seismic Waves), Novosibirsk, 1973, pp. 73–98. (in Russ.)
14. Ayzenberg A.M., Klem-Musatov K.D., Landa E.I. *Seysmicheskiye volny v slozhnopostroyennykh sredakh* (Seismic Waves in Complex Environments), Novosibirsk, 1974, pp. 64–110. (in Russ.)
15. Fedorov F.I. *Teoriya uprugikh voln v kristallakh* (Theory of Elastic Waves in Crystals), Moscow, 1965, 386 p. (in Russ.)
16. Sirotnin Yu.I., Shaskolskaya M.P. *Osnovy kristallogiziki* (Fundamentals of Crystal Physics), Moscow, 1979, 639 p. (in Russ.)
17. Petrashen' G.I. *Rasprostraneniye voln v anizotropnykh uprugikh sredakh* (Wave Propagation in Anisotropic Elastic Media), Leningrad, 1980, 280 p. (in Russ.)
18. Martynov V.N., Mikhaylenko B.G. *Matematicheskiye metody interpretatsii geofizicheskikh nablyudeniy* (Mathematical Methods for Interpreting Geophysical Observations), Novosibirsk, 1979, pp. 85–114. (in Russ.)
19. Babich V.M. *Voprosy dinamicheskoy teorii rasprostraneniya seysmicheskikh voln* (Questions of the Dynamic Theory of Seismic Wave Propagation), Leningrad, 1961, no. 5, pp. 36–46. (in Russ.)
20. Obolentseva I.R., Grechka V.Yu. *Luchevoi metod v anizotropnoy srede (algoritmy, programmy)* (Beam Method in an Anisotropic Environment (Algorithms, Programs)), Novosibirsk, 1989, 225 p. (in Russ.)
21. Brodov L.Yu., Kovtun A.A., Tikhonov A.A. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, 1986, no. 11, pp. 48–57. (in Russ.)
22. Avilova G.M., Rybak S.A. *Soviet Physics. Acoustics*, 1979, no. 1(25), pp. 18–22. (in Russ.)
23. Belubekyan M.V., Ovsepyan V.V. *Acoustical Physics*, 1993, no. 2(39), pp. 370–373. (in Russ.)
24. Pyatakov P.A. *Soviet Physics. Acoustics*, 1980, no. 2(26), pp. 237–241. (in Russ.)
25. Kapsov A.V., Kuznetsov S.V. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, no. 4(79), pp. 388–393.
26. Ilyashenko A.V., Kuznetsov S.V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, no. 9(53), pp. 597–603.
27. Rashidov T.R., Kuznetsov S.V., Mardonov B.M., Mirzayev I. *Prikladnyye zadachi seysmodinamiki sooruzheniy. Kniga 1. Deystviye seysmicheskikh voln na podzemnyy truboprovod i fundamenty sooruzheniy, vzaimodeystvuyushchikh s gruntovoy sredoy* (Applied Problems of Seismodynamics of Structures. Book 1. The Effect of Seismic Waves on Underground Pipelines and Foundations of Structures Interacting with the Soil Environment), Tashkent, 2019, 268 p. (in Russ.)
28. Viktorov I.A. *Zvukovyye poverkhnostnyye volny v tverdykh telakh* (Sound Surface Waves in Solids), Moscow, 1981, 287 p. (in Russ.)
29. Malyuzhinets G.D. *DAN USSR*, 1951, no. 3(78), pp. 439–442. (in Russ.)
30. Shevyakhov N.S. *Soviet Physics. Acoustics*, 1977, no. 1(23), pp. 155–157. (in Russ.)
31. Vladimirov V.S., Zharinov V.V. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* (Equations of Mathematical Physics), Moscow, 2004. (in Russ.)
32. Lyav A. *Matematicheskaya teoriya uprugosti* (Mathematical Theory of Elasticity), Moscow, Leningrad, 1935, 674 p. (in Russ.)
33. Gulyaev Yu.V., Polzikova N.I. *Soviet Physics. Acoustics*, 1978, no. 4(24), pp. 504–507. (in Russ.)
34. Korenev B.G. *Vvedeniye v teoriyu besselevykh funktsiy* (Introduction to the Theory of Bessel Functions), Moscow, 1971. (in Russ.)

Data on authors

- Anton V. Vagin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Electroacoustics and Ultrasonic Technology, Assistant; E-mail: av.vagin@bk.ru
- Alena S. Vorotyntseva** — Master's Student; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Electroacoustics and Ultrasonic Technology; E-mail: avorotyntseva@yandex.ru

Received 10.08.2023; approved after reviewing 03.11.2023; accepted for publication 17.12.2023.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF NOTES

УДК 004.942

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-195-199

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БОНД-ГРАФА ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

В. А. ДМИТРИЕВ*, М. Я. МАРУСИНА

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

Аннотация. Описана общая динамика многозвенных систем, реализующих „шагающий“ принцип передвижения, представлен подход к построению бонд-графа шагающего робота. Представленные механизмы смоделированы для оценки ряда специфических требований, таких как динамика, точность позиционирования и энергия, затрачиваемая для движения. Описан подход к смене одноузловых бонд-графов на бонд-графы в формате мультисвязей узловых векторов и, как следствие, упрощению визуализации формируемой модели. Рассмотрено построение бонд-графа в условиях недетерминированности внешних воздействий, которые имитируются случайным характером получаемой информации.

Ключевые слова: бонд-граф, динамика, анализ, энергия, шагающий робот, недетерминированная среда, сенсорная система

Ссылка для цитирования: Дмитриев В. А., Марусина М. Я. Особенности построения бонд-графа шагающих роботов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 195—199. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-195-199.

FEATURES OF CONSTRUCTING A BOND GRAPH OF WALKING ROBOTS

V. A. Dmitriev*, M. Ya. Marusina

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

Abstract. The general dynamics of multi-link systems that implement the “walking” principle of movement are described, and an approach to constructing a bond graph model of a walking robot is developed. The presented mechanisms are modeled to evaluate a number of specific requirements, such as dynamics, positioning accuracy and energy expended for movement. An approach to changing single-node bond graphs to bond graphs in the format of multi-connections of nodal vectors and, as a consequence, simplifying the visualization of the generated model is described. The construction of a bond graph model under conditions of non-determinism of external influences, which are simulated by the random nature of the information received, is considered.

Keywords: bond graph, dynamics, analysis, energy, walking robot, non-deterministic environment, sensor system

For citation: Dmitriev V. A., Marusina M. Ya. Features of constructing a bond graph of walking robots. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 195—199 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-195-199.

Функциональное динамическое моделирование шагающих механизмов системы позволяет прогнозировать энергоэффективность. В настоящей статье моделирование проведено посредством метода построения бонд-графов; шагающие роботы, в целях упрощения проводимых сравнений, рассмотрены как идеальные многодоменные системы без потерь на работу

систем стабилизации положения. Одной из возможностей моделирования методом построения бонд-графов является посекционное или поэлементное построение, позволяющее вносить изменения в выделенный участок без корректировок всей модели [1—5].

Новизна подхода, предлагаемого в настоящей статье, основывается на секционном моделировании, позволяющем конфигурировать формируемую модель и заменять отдельные части без внесения изменений в оставшиеся элементы, в сочетании с моделированием сенсорных систем с соответствующими шумами, потерями данных и случайными изменениями мощности передаваемого сигнала, что дает возможность предсказать поведение модели в условиях недетерминированности среды.

Для одноногого робота доступны только возможности прыжка. При формировании контактного взаимодействия „ноги“ шагающего робота с опорной поверхностью была использована известная модель прыгающего над землей мяча [6]. Робот подобной конструкции не имеет возможности реализовать квазистатическое движение или сохранять баланс в неподвижном положении. Для управления подобным роботом важно достичь баланс между постоянным и стабильным контролем траектории его движения и приспособлением к внешним возмущающим воздействиям. Наиболее подходящим решением в достижении данного баланса будет реализация стратегии управления импедансом.

Шагающие роботы имеют возможность контроля точки нулевого момента ZMP (Zero Moment Point) [7] посредством системы управления алгоритмом движения. Если робот находится в равновесии, то его ZMP должна находиться внутри области опоры, т.е. внутри контура, образованного точками контакта робота с поверхностью.

В формировании бонд-графа использован подход последовательной детализации системы. По аналогии с представлением переноса центра масс шагающего робота в формате перевернутого маятника, модель которого детализировалась в процессе расчетов от одиночного до двойного перевернутого маятника, принципиальная схема „ноги“ шагающего робота может быть детализирована пошагово с целью постепенного формирования бонд-графа.

Метод построения бонд-графа уже на данном этапе может быть оптимизирован. Представление равными одиночными связями скалярных переменных неоптимально, сложно в построении и ограничивает векторные исчисления. Для более рационального построения корректно использование мультисвязей [8] узловых векторов. Формат подобной замены представления обобщенных связей отражен на рис. 1 (*a* — мультисвязь векторного отображения скалярных переменных; *b* — соответствующие одиночные связи).

$$\begin{array}{c} \xrightarrow[\underline{f}(t)]{\underline{e}(t)} = \begin{array}{c} \xrightarrow[\underline{f}^a(t)]{e^a(t)} \\ \xrightarrow[\underline{f}^b(t)]{e^b(t)} \\ \xrightarrow[\underline{f}^c(t)]{e^c(t)} \end{array} = \begin{array}{c} \xrightarrow[\underline{f}^x(t)]{e^x(t)} \\ \xrightarrow[\underline{f}^y(t)]{e^y(t)} \\ \xrightarrow[\underline{f}^z(t)]{e^z(t)} \end{array} \end{array}$$

Рис. 1

В подобном формате многомерного бонд-графа усилие $e(t)$ и поток $f(t)$ также являются обобщенными переменными, но записываются в векторном представлении $\mathbf{e}(t)$ и $\mathbf{f}(t)$, а мощность определяется следующим выражением:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{e}^T(t) \mathbf{f}(t),$$

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} e^a(t) \\ e^b(t) \\ e^c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^x(t) \\ e^y(t) \\ e^z(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} f^a(t) \\ f^b(t) \\ f^c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^x(t) \\ f^y(t) \\ f^z(t) \end{bmatrix}.$$

С учетом представленных преобразований в векторное представление многодоменного бонд-графа и сформированного подхода к последовательному построению модели возможно секционное формирование оптимальной схемы. Пример на основе сегментов абстрактной „ноги“ робота показан на рис. 2 (при построении пренебрегается трением во всех кинематических парах).

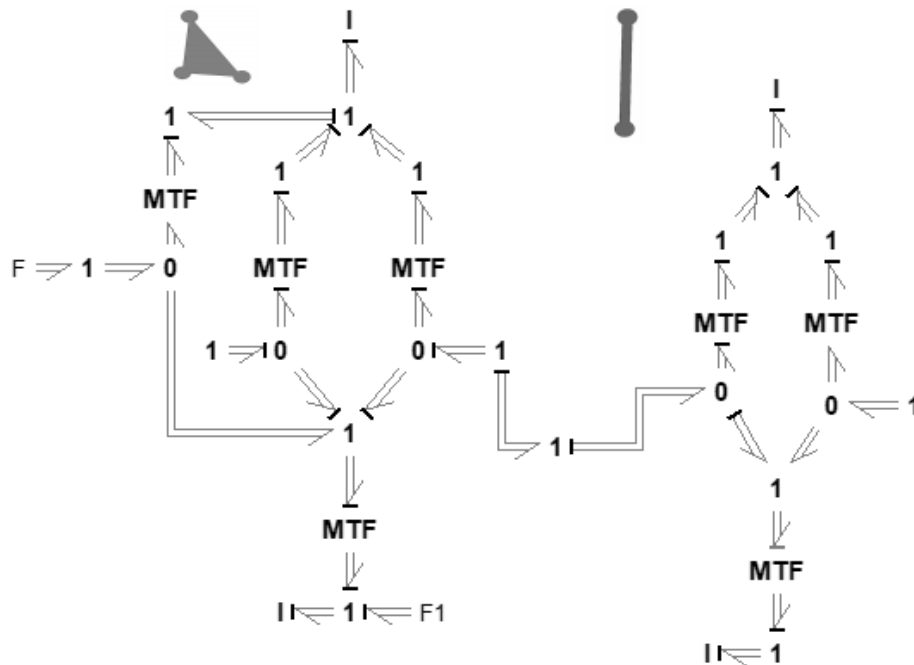


Рис. 2

При построении бонд-графа система рассматривается как единый динамический блок, состоящий из инерциального элемента (I), диссипативного элемента (R) и емкостного элемента (C). Входные данные внешних для системы источников выражаются как элементы источника усилия (Se) и источника потока (Sf). Для многопортовых элементов применяются блоки трансформатора (TF), связывающего величины одного и того же типа с входом и выходом, а именно это преобразует поток в поток и усилие в усилие, и гиратора (GY), связывающего поток с одной стороны с усилием — с другой. Система ограничений и связей представляется в виде 0 и 1, где узел типа 0 показывает общее усилие и только одну входящую причинную связь, а узел типа 1 — напротив, общий поток и одну выходящую причинную связь. При отображении многодоменных систем элементы отображаются как Mx , где x — обозначение скалярного представления элемента: например, MSe — источник усилий. В правой части рис. 2 представлен бонд-граф одиночного тела, в рамках которого поток направлен только через точки соединения, так как центр масс лежит на оси между ними, в отличие от тела в левой части рис. 2, в бонд-графе которого требуется дополнительное соединение, так как центр масс смещен относительно осей точек крепления тела. Такая модель отражает конструктивные особенности робота, но не передает информацию о среде применения.

При формировании базовой пакетной связи, которая наиболее распространена для роботизированных систем и покрывает вопросы передачи как информации о состоянии объектов, так и управляющего сигнала, возникает ряд эффектов: затухание, искажение, потеря пакетных данных и изменение времени прохождения сигнала в обоих направлениях. Для корректного моделирования функционирования системы в условиях недетерминированной среды необходимо данные выше эффекты использовать при построении бонд-графа.

На рис. 3 проиллюстрировано моделирование канала связи для сенсорной системы (PTX — мощность передаваемого сигнала, RSS — уровень передаваемого сигнала, NL — уровень шума, DPL — потеря пакетов данных, RTT — время прохождения сигнала, включая

задержку). Бонд-граф реализован таким образом, что сохраняется возможность включения и исключения параметров без необходимости реконфигурирования всей модели.

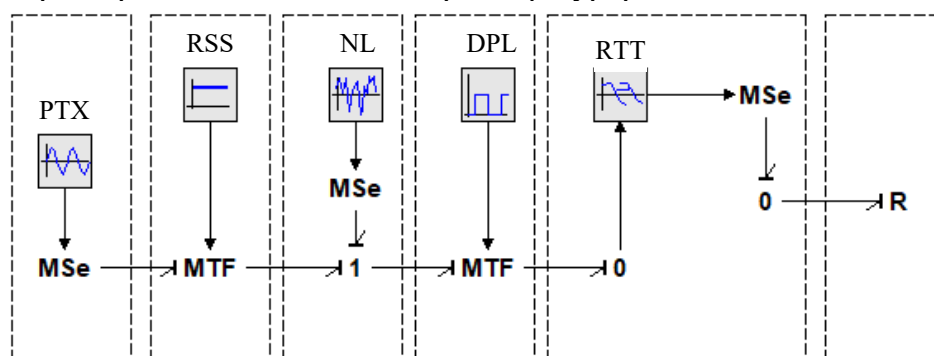


Рис. 3

Все представленные связи активируются посредством усилия, а значение потока равно нулю. Это необходимо для того, чтобы в модели информационной системы не было обмена энергией.

Представленные возможности графического моделирования методом бонд-графа в сочетании со сформированными подходами к построению модели дают возможности поэтапного моделирования конструкции робототехнической системы в оптимальном формате с применением векторного представления многопоточного бонд-графа и возможности корректного моделирования каналов сенсорной и управляющей связи с учетом потерь пакетов данных, зашумления сигнала, изменения его уровня и мощности. Совокупность данных параметров позволяет моделировать условия недетерминированности внешней среды и учитывать их при построении бонд-графа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krishnan V. L., Pathak P. M., Jain S. C., & Samantaray A. K. Reconfiguration of four-legged walking robot for actuator faults // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt I. Journal of Systems and Control Engineering. 2011. P. 11—26.
2. Zhou X. and Cui Y. Dynamic characteristics of single-loop gear system based on bond graph method // J. of Vibroengineering. 2022. Vol. 24, N 3. P. 604—614.
3. Gonzalez-Avalos G., Gallegos N. B., Ayala-Jaimes G., Garcia A. P., Ferreyra García L. F., Rodríguez A. J. P. Modeling and Simulation of Physical Systems Formed by Bond Graphs and Multibond Graphs // Symmetry in Graph Algorithms and Graph Theory III. 2023. Vol. 15, N 12. P. 2170.
4. Bayart M., Bouamama B. O., & Conrard B. FDI of Smart Actuators Using Bond Graphs and External Models // IFAC Proceedings. 2002. Vol. 35, N 1. P. 391—396.
5. Shojaei Barjuei E., Caldwell D. G., & Ortiz J. Bond Graph Modeling and Kalman Filter Observer Design for an Industrial Back-Support Exoskeleton // Designs. 2020. Vol. 4, N 4. P. 53.
6. Дмитриев В. А. Элементы моделирования контактного взаимодействия средствами программного пакета 20Sim // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. 2022. С. 83—86.
7. Napoleon, Nakaura S., & Sampei M. Balance control analysis of humanoid robot based on ZMP feedback control // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and System. 2002. P. 2437—2442.
8. Balaño J. L. Bond Graph Modeling of Incompressible Thermofluid Flows // 18th Intern. Congr. of Mechanical Engineering. Ouro Preto, 6—11 November, 2005.

Сведения об авторах

Валентин Алексеевич Дмитриев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: valentinswsu@mail.ru

Мария Яковлевна Марусина

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: myamarusina@itmo.ru

Поступила в редакцию 30.10.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Krishnan V.L., Pathak P.M., Jain S.C., & Samantaray A.K. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2011, pp. 11–26.
2. Zhou X. and Cui Y. *Journal of Vibroengineering*, 2022, no. 3(24), pp. 604–614.
3. Gonzalez-Avalos G., Gallegos N.B., Ayala-Jaimes G., Garcia A.P., Ferreyra García L.F., Rodríguez A.J.P. *Symmetry in Graph Algorithms and Graph Theory III*, 2023, no. 12(15), pp. 2170.
4. Bayart M., Bouamama B.O., & Conrard B. *IFAC Proceedings*, 2002, no. 1(35), pp. 391–396.
5. Shojaei Barjuei E., Caldwell D.G., & Ortiz J. *Designs*, 2020, no. 4(4), pp. 53.
6. Dmitriyev V.A. *Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii, avtomatizatsii i mekhatronike* (Information Technologies in Control, Automation and Mechatronics), Collection of Scientific Papers of the 4th International Scientific and Technical Conference, 2022, pp. 83–86. (in Russ.)
7. Napoleon Nakaura S., & Sampei M. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, 2002, pp. 2437–2442.
8. Baliño J.L. *18th International Congress of Mechanical Engineering*, 2005, Ouro Preto, November, 6–11, 2005.

Data on authors

Valentin A. Dmitriev

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: valentinswsu@mail.ru

Maria Ya. Marusina

— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: myamarusina@itmo.ru

Received 30.10.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 17.12.2023.

ГИБРИДНЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА ДАННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. Ю. СКОБЦОВ^{*1}, Б. В. СОКОЛОВ², В.-А. ЧЖАН³, М. ФУ³

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

²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

³Колледж информационной инженерии Чжэцзянского технологического университета,
Ханчжоу, Китай

Аннотация. Рассмотрена задача мониторинга состояния сложных объектов различной природы на основе классификационного и регрессионного анализа данных временных рядов. Разработаны и исследованы гибридные нейросетевые модели классификационного и регрессионного анализа с использованием данных о функционировании систем трех типов: космических аппаратов, информационной системы и экономической системы, представленных в виде временных рядов. Для всех типов систем предложенные гибридные модели показали преимущество по точности. Разработан генетический алгоритм автоматического поиска гибридных нейросетевых моделей, с помощью которого сгенерированы модели различной сложности с точностью не ниже моделей, разработанных вручную. В конце поиска отмечено, что значения фитнес-функций сгенерированных гибридных нейронных сетей близки к максимальным. Это можно рассматривать как экспериментальное подтверждение построения решения, близкого к оптимальному для определенных параметров поиска.

Ключевые слова: мониторинг сложных объектов, гибридные нейронные сети, классификация, регрессия, данные временных рядов

Благодарности: исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Скобцов В. Ю., Соколов Б. В., Чжан В.-А., Фу М. Гибридные нейросетевые модели мониторинга данных временных рядов сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 200—204. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-200-204.

HYBRID NEURAL NETWORK MODELS FOR MONITORING TIME SERIES DATA OF COMPLEX OBJECTS

V. Yu. Skobtsov^{*1}, B. V. Sokolov², W.-A. Zhang³, M. Fu³

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

²St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia

³College of Information Engineering of Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, China

Abstract. The problem of monitoring the state of complex objects of various natures based on classification and regression analysis of time series data is considered. Hybrid neural network models of classification and regression analysis are developed and studied using data on the functioning of three types of systems: spacecraft, information system and economic system, presented in the form of time series. For all types of systems, the proposed hybrid models demonstrate an advantage in accuracy. A genetic algorithm is developed for the automatic search of hybrid neural network models, with the help of which models of varying complexity are generated with an accuracy no lower than for models developed manually. As a result of the search, it is noted that the generated hybrid neural networks show results close to the maximum value of the fitness function. The fact is considered as experimental confirmation of the constructed solution to be close to optimal for certain search parameters.

Keywords: monitoring of complex objects, hybrid neural networks, classification, regression, time series data

Acknowledgment: Research carried out on this topic was carried out with partial financial support from the budget topic FFZF-2022-0004.

For citation: Skobtsov V. Yu., Sokolov B. V., Zhang W.-A., Fu M. Hybrid neural network models for monitoring time series data of complex objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 200—204 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-200-204.

Большое количество статистической информации, поступающей и накапливающейся в специализированных хранилищах данных, может быть эффективно использовано для совершенствования процесса анализа и мониторинга жизненного цикла сложных объектов (СЛО). К сложным могут быть отнесены практически все объекты, входящие в состав аэрокосмических, робототехнических, транспортно-логистических, информационных, экономических, производственных и других систем.

Мониторинг состояния функционирования СЛО заключается в оценке, прогнозировании, диагностике и анализе состояния таких объектов с целью своевременного обнаружения и предотвращения нештатных ситуаций [1].

Будем рассматривать анализируемый массив данных функционирования СЛО как M -мерный временной ряд $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M)$, каждый элемент которого $\mathbf{X}_j \in R^T$ является столбцом матрицы $\mathbf{X}$ данных показателей СЛО, описывающим поведение j -го показателя системы на отрезке дискретных моментов времени $[1, T]$.

В процессе мониторинга данных о функционировании СЛО, представленных временным рядом, может решаться задача классификации его состояния как некоторой категориальной метки класса целевого параметра $\mathbf{Y} \in \{0, 1, \dots, k-1\}$ или регрессионного анализа динамики изменения вещественного значения целевого параметра $\mathbf{Y} \in R^T$. Таким образом, необходимо найти модель нелинейного отображения входных данных временного ряда $\mathbf{X}$ в целевой вектор $\mathbf{Y} \in R^T$.

В последние несколько лет эффективное применение в задачах анализа данных различных типов находят так называемые гибридные глубокие нейронные сети, архитектура которых объединяет различные типы нейронных слоев: сверточных, рекуррентных, полносвязных. В работах [2, 3] приведены результаты, показывающие превосходство качества гибридных нейросетевых моделей для задач анализа данных временных рядов.

Поэтому нами были исследованы и разработаны гибридные нейросетевые модели на основе комплексирования одномерных сверточных, рекуррентных типа GRU и полносвязных нейронных слоев как итоговых классификаторов/регрессоров для задач классификации/регрессии данных различной природы [4—6]. Также в моделях применялась методика остаточных связей архитектур ResNet [7], поскольку это упрощает обучение сети за счет уменьшения эффекта исчезающего градиента.

Предложенные гибридные нейросетевые модели имеют в общем случае следующую структуру:

```


$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_1 &= \text{Conv1D}(\text{filters}=\mathbf{n}, \text{kernel\_size}=\mathbf{k1}, \text{activation}=\text{'AF1'}) (\mathbf{X}_i) \\
\mathbf{Z}_1 &= \text{Conv1D}(\text{filters}=\mathbf{n}, \text{kernel\_size}=\mathbf{k1}, \text{activation}=\text{'AF1'}) (\mathbf{Z}_1) * \text{C1 слоев} \\
\mathbf{Z}_2 &= \text{add}([\mathbf{Z}_1, \mathbf{X}_i]) - \text{остаточная связь of } \mathbf{X}_i \\
\mathbf{Z}_2 &= \text{AveragePooling1D}(\mathbf{p}) (\mathbf{Z}_2) \\
\mathbf{Z}_3 &= \text{Conv1D}(\text{filters}=\mathbf{n}, \text{kernel\_size}=\mathbf{k2}, \text{activation}=\text{'AF1'}) (\mathbf{Z}_2) \\
\mathbf{Z}_3 &= \text{Conv1D}(\text{filters}=\mathbf{n}, \text{kernel\_size}=\mathbf{k2}, \text{activation}=\text{'AF1'}) (\mathbf{Z}_2) * \text{C2 слоев} \\
\mathbf{Z}_4 &= \text{AveragePooling1D}(\mathbf{p}) (\mathbf{X}_i)
\end{aligned}$$


```

```
Output = add([Z_2, Z_3, Z_4]) – остаточная связь of Z_2 and Z_3  
Output = GRU(units=r)  
Output = Dense(32, activation=' AF1') (Output) * C3 слоев  
Output = Dense(2, activation=' AF2') (Output)
```

На основе данной структуры разработаны и исследованы гибридные нейросетевые классификационные модели, решающие задачи определения штатного и нештатных категориальных состояний на основе анализа данных временных рядов телеметрической информации (ТМИ) двух типов: навигационной подсистемы Белорусского космического аппарата (БКА) и бортовой аппаратуры группировки малых КА „АИСТ“ Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королёва. Рассматривались двух- и трехклассовые задачи классификации для определения штатного и нештатного состояния космического аппарата. Выполнен сравнительный анализ с известными глубокими нейросетевыми классификаторами: LeNet, AlexNet, Xception, Yolo, MobileNet, Inception, ResNet. Для задачи бинарной классификации на данных ТМИ БКА разработанная гибридная нейросетевая модель сравнима по точности с нейросетевой классификационной Inception (остальные классификаторы имеют меньшую точность): ~0,98 (этап обучения), ~0,97 (этапы валидации и тестирования). При этом полученная гибридная модель в 2,5 раза быстрее по времени обучения и валидации и имеет более облегченную структуру, что важно для ее реализации. Для задачи трехклассовой классификации на данных ТМИ КА „АИСТ“ для разработанной гибридной нейросетевой модели получены значения точности: ~0,998 (этап обучения), ~0,981 (этап валидации) и ~0,985 (этап тестирования). Сравнительный анализ показал преимущество полученного решения по точности классификации на этапе тестирования для всех сравниваемых моделей на 1—7 %, по времени обучения и валидации почти для всех сравниваемых моделей получено преимущество в 1,5—4 раза.

С целью сокращения времени создания нейросетевых моделей разработан генетический автоматический поиск гибридных нейросетевых моделей, который применен для анализа данных ТМИ КА и для обнаружения сетевых атак в наборе данных kddcup [6]. Предложенный метод autoML выполняет поиск не только значений гиперпараметров, но и модели гибридной нейронной сети в целом заданной выше структуры и генерирует модель в программном коде языка Python. Для данных ТМИ КА „АИСТ“ наилучшее значение фитнес-функции, достигнутое в ходе эксперимента, составляет 98,8 %, для данных ТМИ БКА — 98 %, что превышает показатели для моделей, разработанных вручную. В конце поиска было отмечено, что представители с разными хромосомами — нейронными сетями — показали результаты, близкие к максимальному значению фитнес-функции. Данный факт можно рассматривать как экспериментальное подтверждение построения решения, близкого к оптимальному, для определенных параметров поиска.

Для задачи анализа инновационной динамики экономического СЛО разработана гибридная нейросетевая регрессионная модель на основе представленной выше архитектуры. Анализ выполнялся для сформированных временных рядов на основе данных веб-портала Росстата. Предложенные гибридные нейросетевые регрессионные модели сравнивались с полносвязной регрессионной и одномерной сверточной нейросетевыми моделями. Результаты обучения и тестирования нейросетевых регрессионных моделей указанных архитектур показывают, что лучшие значения показателей MSE, RMSE и коэффициента детерминации R^2 наблюдаются у разработанной гибридной регрессионной нейросетевой модели, как по значениям MSE и RMSE, так и по R^2 (0,0029; 0,0538; 0,9962). Показатели качества моделей полносвязной и сверточной регрессионных моделей хуже, особенно — по значениям MSE и RMSE (0,0315; 0,2477; 0,9211) и (0,0287; 0,1696; 0,9625) соответственно.

В силу показанного выше преимущества гибридных нейросетевых моделей для решения задач анализа и мониторинга данных о функционировании СЛО целесообразно далее ис-

следовать гибридные нейросетевые модели на основе их комплексирования с классическими моделями нелинейных отображений и фильтров, а также классических моделей машинного обучения. Перспективным представляется исследование инвариантного расширенного фильтра Калмана и диффузионных отображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 7—14.
2. Chen H., Zhang Zh. Hybrid neural network based on novel audio feature for vehicle type identification // 2020 IEEE Intern. Instrumentation and Measurement Technology Conf. (I2MTC). 25–28 May 2020. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129183.
3. Zhao N. Combination of Convolution-al Neural Network and Gated Recurrent Unit for Aspect-Based Sentiment Analysis // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 15561—15569. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052937.
4. Skobtsov V. Yu. Binary classification of small satellites telemetry data based on deep learning approach // Applied Aspects of Information Technology. 2021. Vol. 4, N 4. P. 299—310.
5. Скобцов В. Ю., Соколов Б. В. Гибридные нейросетевые модели в задаче мультиклассовой классификации данных телеметрической информации малых космических аппаратов // Вестн. ВГУ. Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 3. С. 99—114.
6. Skobtsov V. Y., Stasiuk A. Automatic Searching the Neural Network Models for Time Series Classification of Small Spacecraft's Telemetry Data with Genetic Algorithms // Artificial Intelligence Application in Networks and Systems. CSOC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 724. P. 800—811.
7. Kaiming H. et al. Deep Residual Learning for Image Recognition // Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015. <https://arxiv.org/abs/1512.03385>.

Сведения об авторах

Вадим Юрьевич Скобцов

канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра компьютерных технологий и программной инженерии, доцент; E-mail: vasko_vasko@mail.ru

Борис Владимирович Соколов

д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; главный научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Вен-Ан Чжан

канд. техн. наук, профессор, Колледж информационной инженерии Чжэцзянского технологического университета, декан колледжа и директор департамента международного сотрудничества; E-mail: wazhang@zjut.edu.cn

Минглей Фу

канд. техн. наук, профессор, Колледж информационной инженерии Чжэцзянского технологического университета, зам. директора департамента международного сотрудничества; E-mail: fuml@zjut.edu.cn

Поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 17.11.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Okhtilev M.Yu., Mustafin N.A., Miller V.E., Sokolov B.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 11(57), pp. 7–15. (in Russ.)
2. Chen H., Zhang Zh. *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC): Proceedings of the International Conference*. May 25–28, 2020, DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129183.
3. Zhao N. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 15561–15569, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052937.
4. Skobtsov V.Yu. *Applied Aspects of Information Technology*, 2021, no. 4(4), pp. 299–310.
5. Skobtsov V.Yu., Sokolov B.V. *Bulletin of the VSU. System analysis and information technology*, 2022, no. 3, pp. 99–114. (in Russ.)
6. Skobtsov V.Y., Stasiuk A. *Artificial Intelligence Application in Networks and Systems. CSOC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, vol. 724, pp. 800–811.
7. Kaiming H. et al. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, <https://arxiv.org/abs/1512.03385>.

Data on authors

- Vadim Yu. Skobtsov** PhD, Associate Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Computer Technology and Software Engineering; Associate Professor; E-mail: vasko_vasko@mail.ru
- Boris V. Sokolov** Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru
- Wen-An Zhang** PhD, Professor, College of Information Engineering of Zhejiang University of Technology, Dean of the College and Director of International Cooperation Department; E-mail: wazhang@zjut.edu.cn
- Minglei Fu** PhD, Professor, College of Information Engineering of Zhejiang University of Technology, Deputy Director of International Cooperation Department; E-mail: fuml@zjut.edu.cn

Received 01.11.2023; approved after reviewing 17.11.2023; accepted for publication 17.12.2023.