

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

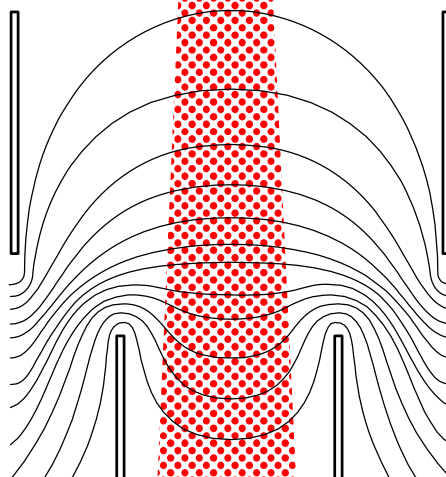
Печатная версия

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



№ **5**
Т. 65
2022

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



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

проф. А. А. БОБЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

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

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *И. М. Игошина*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

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

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

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

Подписано в печать 01.06.2022 г.

Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Рукопись должна содержать:

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

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

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

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

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

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

Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Ефанов Д. В. Троичные модульные коды с суммированием для синтеза цифровых самопроверяемых устройств307

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Жарух А., Колюбин С. А. Анализ производительности и настройка статических параметров однозапросных планировщиков траекторий323
- Кабанов А. А., Зуев А. В., Филаретов В. Ф., Жирабок А. Н. Идентификация дефектов в линейных системах на основе методов оптимального управления.....335

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Громов О. В., Гулиев Р. Б., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина343

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Азарян Д. К., Медунецкий В. М. Показатели эффективности технологического оборудования350

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Гневашев Ю. В., Горшков К. С., Коновалов Г. А., Ловлин С. Ю., Посохов Д. А., Цветкова М. Х. Влияние способов управления в системах виртуальной реальности на возникновение симптомов локомоционной болезни357
- Сизая А. В., Цивильский И. В. Динамическая модель системы эластично связанных частиц для топологической оптимизации изделий из композитов372

EDITOR-IN-CHIEF

prof. ALEXEY BOBTSOV

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

ISMAILOV TAGIR, prof., DSTU, Makhachkala, Russia

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

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

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

RASPOPOV VLADIMIR, prof., TSU, Tula, Russia

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

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

TITOV VITALY, prof., SWSU, Kursk, Russia

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

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

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

SHLISHEVSKY VIKTOR, prof., SSGA, Novosibirsk, Russia

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

FOREIGN MEMBERS

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

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

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

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

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

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

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

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

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@ifmo.ru

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65

MAY 2022

№ 5

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

- Efanov D. V.** Ternary Modular Codes with Summation for the Synthesis of Digital Self-Testing Devices307

INSTRUMENTS AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Jaroukh A., Kolyubin S. A.** Performance Analysis and Static Parameters Setting of Single-Query Trajectory Planners323
- Kabanov A. A., Zuev A. V., Filaretov V. F., Zhirabok A. N.** Identification of Defects in Linear Systems Based on Optimal Control Methods335

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Gromov O. V., Gulyev R. B., Chernyak T. A., Maiorov E. E., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S.** Application of the Total Internal Reflection Method for the Study of Liquid-Phase Medium Based on Botulinum Toxin343

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Azaryan D. K., Medunetskiy V. M.** Technological Equipment Efficiency Indicators350

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Gnevashev Yu. V., Gorshkov K. S., Konovalov G. A., Lovlin S. Yu., Posokhov D. A., Tsvetkova M. Kh.** Impact of Control Methods in Virtual Reality Systems on the Occurrence of Locomotion Disease Symptoms357
- Sizaya A. V., Tsivilskiy I. V.** Dynamic Model of a System of Elastically Coupled Particles for Topological Optimization of Composite Material Products372

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

ТРОИЧНЫЕ МОДУЛЬНЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ
ДЛЯ СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ

Д. В. ЕФАНОВ*

*Российский университет транспорта, Москва, Россия,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

**TrES-4b@yandex.ru*

Аннотация. Рассматриваются троичные коды с суммированием, предназначенные для синтеза цифровых самопроверяемых схем, функционирующих в троичной логике и обладающих свойством обнаружения любых не композиционных (при которых число символов каждого вида сохраняется) ошибок в информационных векторах. Приводятся правила построения троичных кодов с суммированием, которые по своим свойствам схожи с бинарным кодом Бергера. Рассматриваются две модификации троичного кода с суммированием — коды с суммированием в кольце вычетов по модулям $\mu=3$ и $\mu=9$ — и некоторые характеристики обнаружения ошибок этими кодами. Показано, что доля необнаруживаемых троичными кодами с суммированием ошибок кратностью d от общего числа ошибок данной кратностью является постоянной величиной, не зависящей от длины информационного вектора.

Ключевые слова: отказоустойчивые и самопроверяемые цифровые устройства и системы, помехоустойчивое и помехозащищенное кодирование, троичные коды с суммированием, троичные модульные коды с суммированием, обнаружение ошибок в информационных векторах, необнаруживаемая ошибка

Ссылка для цитирования: Ефанов Д. В. Троичные модульные коды с суммированием для синтеза цифровых самопроверяемых устройств // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 307—322. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-307-322.

TERNARY MODULAR CODES WITH SUMMATION
FOR THE SYNTHESIS OF DIGITAL SELF-TESTING DEVICES

D. V. Efanov*

*Russian University of Transport, Moscow, Russia
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

**TrES-4b@yandex.ru*

Abstract. Ternary summation codes with simple construction rules, suitable for the digital self-checking circuits synthesis operating in ternary logic and able of detecting any non-compositional errors in information vectors (when the number of characters of each type is preserved), are considered. Rules for constructing the ternary sum codes, similar in its properties to the Berger binary code, are given. Two modifications of the ternary sum code are described – sum codes in the residues modulo $\mu=3$ and $\mu=9$ ring. Several characteristics of error detection by the codes are described. It is shown that the proportion of errors of multiplicity d , undetectable by binary summation codes, of the total number of errors of the given multiplicity, is a constant value independent of the information vector length.

Keywords: fault-tolerant and self-testing digital devices and systems, noise-resistant and noise-proof coding, ternary codes with summation, error detection in information vectors, undetectable error

Введение. С развитием техники и технологий возрастает актуальность исследований по усовершенствованию принципов представления данных, а также увеличению мощности вычислительных систем наряду с уменьшением их габаритов и повышением скорости выполнения процедур.

Основным способом построения отказоустойчивых и самопроверяемых цифровых устройств и систем является внесение аппаратной и программной избыточности [1—4]. При этом широко применяются методы кодирования и защиты информации [5—7], использование которых позволяет при заданных условиях и ограничениях синтезировать высоконадежные и безопасно функционирующие цифровые устройства, применяемые в современных управляющих комплексах [8]. Микроэлектронные компоненты и типовые блоки цифровых устройств постоянно совершенствуются, повышается их быстродействие, уменьшаются габариты, увеличивается число элементарных единиц, размещаемых на одном кристалле и т.д. [9, 10]. В настоящее время осуществляется реализация транзисторов миниатюрных размеров (достигнута технология 7 нм и менее [11, 12]) и отмечаются возможности создания транзистора с минимальным числом электронов (одним) [13]. В этом случае достигается физический предел реализации данного вида элементов, а значит, требуются и развитие используемых парадигм, и переход к новым формам представления цифровой информации. Одним из таких переходов может стать переход от использования двоичной логики в представлении данных к использованию троичной логики [14]. В мировом научном сообществе более полувека активно обсуждаются вопросы синтеза цифровых устройств и систем, функционирующих по принципам троичной логики. Известны и конкретные реализации подобных систем, отдельных логических элементов и функциональных устройств, к примеру, описанные в [15—18].

Для защиты данных и синтеза надежных цифровых устройств, функционирующих в троичной логике, также применяются методы кодирования [19—21]. Как и для устройств, реализующих принципы двоичной логики, устройства троичной логики могут быть синтезированы с использованием помехоустойчивых и помехозащищенных кодов, принадлежащих к типу блочных равномерных кодов. При этом для ряда задач, например синтеза самотестируемых и самопроверяемых цифровых устройств, могут эффективно использоваться коды, ориентированные на обнаружение ошибок, а не на их исправление. Такие коды имеют меньшую избыточность и соответственно вносят меньшие аппаратные затраты при построении устройства, чем корректирующие коды [22]. Среди кодов с обнаружением ошибок известны композиционные коды (коды с сохранением числа различных уровней цифровых сигналов [23, 24]) и коды с суммированием [25]. Первые коды являются неразделимыми, а вторые — разделимыми. В [26, 27] описаны аналоги классических двоичных кодов Бергера, построенные в трехпозиционной системе, перечислены достоинства и недостатки данных кодов и предлагается рассмотреть коды с суммированием, для которых используется процедура расчета количества уровней цифровых сигналов в кольце вычетов по модулям $\mu=3$ и $\mu=9$. Такие коды можно считать аналогами классических двоичных кодов Боуза — Лина [28, 29].

Цель представленного в настоящей статье исследования — анализ характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах троичных модульных кодов с суммированием, учет которых целесообразен при решении задач синтеза отказоустойчивых и самопроверяемых цифровых устройств и систем, функционирующих в троичной логике.

Троичные коды с суммированием. Для представления данных в троичной логике будем использовать символы из множества $\{0, 1, 2\}$, при этом ориентируясь не на какую-либо из троичных систем счисления, а полагая, что элементарное устройство характеризуется

трем состояниями (один трит данных кодируется тремя различными способами). Например, 6-битный вектор может быть представлен последовательностью числовых значений $\langle 011201 \rangle$.

Введем следующие характеристики троичных кодовых векторов: r_1 — число разрядов кодового вектора, принимающих значение 1, и r_2 — число разрядов кодового вектора, принимающих значение 2. Очевидно, что число разрядов кодового вектора длиной m , принимающих значение 0, определяется как разность: $m - r_1 - r_2$. Для приведенного примера кодового вектора $r_1=3$ и $r_2=1$.

Зная параметры r_1 и r_2 , можно, например, получить все кодовые векторы, принадлежащие композиционному коду $C_m^{r_1, r_2}$. Число кодовых векторов с одинаковой композицией чисел 1 и 2 (с одинаковыми r_1 и r_2) определяется величиной $C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2}$, где первый множитель определяет количество вариантов расположений в информационном векторе разрядов, равных 1, а второй — разрядов, равных 2 (количество вариантов расположений разрядов, равных 0, определяется однозначно и равно $C_{m-r_1-r_2}^{m-r_1-r_2} = 1$). Для кода $C_6^{3,1}$ мощность множества кодовых слов определяется величиной $C_6^3 C_3^1 = 20 \cdot 3 = 60$.

В классических кодах с суммированием (обозначим их как Σ_m -коды) всем информационным кодовым векторам с одинаковыми числами r_1 и r_2 соответствуют одинаковые контрольные векторы [26, 27]. Другими словами, для построения Σ_m -кода необходимо определить числа r_1 и r_2 , записать их в троичном виде и расположить последовательно в разрядах контрольных векторов. Так как максимальные значения чисел r_1 и r_2 равны $r_1=r_2=m$, то для представления каждого из них в троичном виде требуется по $\lceil \log_3(m+1) \rceil$ разрядов (запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения). Избыточность Σ_m -кода, таким образом, равна $k = 2 \lceil \log_3(m+1) \rceil$. Для 6-битного информационного вектора, например, избыточность определяется числом $k=4$ (так, если $m=100$, то $k=10$).

Указанные особенности построения Σ_m -кодов позволяют наделить их определенными свойствами обнаружения ошибок в информационных векторах — свойством обнаружения ошибок определенной кратностью и конкретного вида. Под кратностью d ошибки понимается число искажаемых разрядов, а вид определяется совокупностью числа искажений разрядов, равных 0, 1 и 2.

Ошибки по видам классифицируются на монотонные и немонотонные, а последние, в свою очередь, на композиционные и асимметричные [28, 29]. Такая классификация вытекает из принципов применения избыточного кодирования для построения цифровых устройств — использования особенностей обнаружения ошибок для их идентификации в вычислениях данных устройствами. Монотонная ошибка в троичном кодовом векторе — это ошибка, при которой сохраняется приоритет значений, определенный в каждом из известных классов троичных монотонных функций. Известно [30], что в троичной логике имеется три класса монотонных функций (классы M_1 , M_2 и M_3). Класс M_1 — монотонные функции, для которых при сравнении аргументов принят порядок $0 < 1 < 2$. Класс M_2 — монотонные функции, для которых при сравнении аргументов принят порядок $1 < 2 < 0$. Класс M_3 — монотонные функции, для которых при сравнении аргументов принят порядок $2 < 0 < 1$. Монотонные ошибки в троичных кодовых векторах могут быть классифицированы на подвиды (однонаправленная, двунаправленная и др.). Немонотонная ошибка — это ошибка, при которой приоритет значений, определенный в каждом из известных классов троичных монотонных функций, не сохраняется. Среди немонотонных ошибок выделяется класс композиционных ошибок — ошибок, при которых сохраняются числа r_1 и r_2 . Например, все ошибки данного класса не будут

обнаружены Σ_m -кодами. Если же композиция чисел 1 и 2 нарушается при ошибке, то такая ошибка называется асимметричной (для асимметричных ошибок, так же как и для монотонных, могут быть выделены подвиды).

Σ_m -коды обнаруживают любые монотонные и асимметричные ошибки, но не обнаруживают любые композиционные ошибки [26, 27]. При этом число k для них зависит от m и при малой длине информационного вектора существенно. В целях уменьшения избыточности кода и сохранения постоянным числа k при любых m могут быть использованы принципы модулярной арифметики — вычисления параметров r_1 и r_2 в кольце вычетов по заранее установленному модулю μ . Эффективным является применение модулей из множества $\mu \in \{3^1, 3^2, \dots, 3^{\lceil \log_3(m+1) \rceil - 1}\}$. В этом случае используются все возможные варианты построения контрольных векторов. Коды с суммированием, для которых используется операция суммирования в кольце вычетов по модулю μ , обозначим как Σ_m^μ -коды и далее будем называть модульными кодами с суммированием. Модульные коды с суммированием не обнаруживают все композиционные ошибки и некоторые монотонные и асимметричные ошибки.

Особенности обнаружения ошибок троичными модульными кодами с суммированием. Для анализа характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах кодами с суммированием предварительно производится их разбиение на группы, соответствующие одинаковым контрольным векторам (контрольные группы) [31]. Затем анализируются переходы между каждой парой векторов, входящих в одну и ту же контрольную группу, что позволяет определить кратность необнаруживаемой ошибки и ее вид. Рассмотрим распределение информационных векторов на контрольные группы для Σ_4^3 -кода (табл. 1).

Таблица 1

Контрольные группы, $r_1(\text{mod}3)-r_2(\text{mod}3)$								
0-0	0-1	0-2	1-0	1-1	1-2	2-0	2-1	2-2
Информационные векторы								
0000	0002 0020 0200 2000	0022 0202 0220 2002 2020 2200	0001 0010 0100 1000	0012 0021 0102 0120 0201 0210 1002 1020 1200 2001 2010 2100	0122 0212 0221 1012 1021 1022 1202 1220 2012 2021 2201 2210	0011 0101 0110 1001 1010 1100	0112 0121 0211 0221 1012 1102 1120 1201 1210 2011 2101 2110	1122 1212 1221 2112 2121 2211
0111 1011 1101 1110 0222 2022 2202 2220	2222 1112 1121 1211 2111		1111 1222 2122 2212 2221					

Контрольные группы соответствуют всем возможным комбинациям чисел $r_1(\text{mod}3)$ и $r_2(\text{mod}3)$. В таблице каждая контрольная группа выделена как $r_1(\text{mod}3)-r_2(\text{mod}3)$ -группа. Для простоты изложения далее обозначим числа $r_1(\text{mod}\mu)$ и $r_2(\text{mod}\mu)$ как a и b соответственно, а группы — как $a-b$ -группы. В таблице информационные векторы распределены не только по контрольным группам, но и выделены две категории векторов (верхняя и нижняя части таб-

лицы): в верхней части указаны информационные векторы, для которых $r_1=r_1(\text{mod}3)$ и $r_2=r_2(\text{mod}3)$, в нижней — векторы, для которых эти равенства нарушаются. Между информационными векторами одной контрольной группы, но принадлежащими только верхней или только нижней части таблицы, возможно возникновение лишь композиционной ошибки, тогда как между векторами одной контрольной группы, но принадлежащими разным частям таблицы, возникают монотонные и асимметричные ошибки. Таким образом, любой модульный троичный код с суммированием не будет обнаруживать любые композиционные ошибки в информационных векторах, а также некоторую долю монотонных и асимметричных ошибок. Число ошибок, не обнаруживаемых Σ_4^3 -кодом, по сравнению с числом ошибок, не обнаруживаемых немодульным кодом с суммированием, увеличится, но при этом число контрольных разрядов не будет зависеть от длины информационного вектора и будет постоянным для выбранного значения модуля μ .

Анализируя табличную форму задания Σ_m^μ -кода, можно вычислить общее количество необнаруживаемых ошибок по видам и кратностям. Для расчета требуется определить число контрольных групп и состав информационных векторов в них. Число контрольных групп определяется значением модуля μ . Для чисел r_1 и r_2 существуют только наименьшие неотрицательные вычеты из множества $\{0, 1, \dots, \mu-1\}$. Мощность данного множества равна μ . Таким образом, общее число контрольных групп определяется величиной μ^2 . К примеру, в рассматриваемом случае (см. табл. 1) имеется $3^2 = 9$ контрольных групп. Необходимо заметить, что для кодов с различными значениями m и μ часть контрольных групп могут оказаться пустыми. Общее число необнаруживаемых Σ_m^μ -кодом ошибок определяется как

$$N_{m,k} = \sum_{a=0, b=0}^{a=\mu-1, b=\mu-1} N_{a-b}, \quad (1)$$

где N_{a-b} — число необнаруживаемых ошибок в контрольной группе $a-b$, для расчета которого необходимо определить число Q_{a-b} — общее количество информационных векторов в контрольной группе:

$$Q_{a-b}^* = Q_{a-b} (Q_{a-b} - 1). \quad (2)$$

Как отмечено выше, количество информационных векторов с одинаковыми числами r_1 и r_2 равно $C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{r_2}$. При этом указанная величина определяет общее число информационных векторов только в том случае, когда рассчитываются числа r_1 и r_2 , а не вычеты для них $r_1(\text{mod}\mu)$ и $r_2(\text{mod}\mu)$. Можно сказать, что в данном случае речь идет о Σ_m -коде, а не о Σ_m^μ -коде. Однако Σ_m^μ -код напрямую получается из Σ_m -кода с такой же длиной информационного вектора. Например, в табл. 1 задан Σ_4^3 -код, который получен из Σ_4 -кода. Все векторы нижней части таблицы — это контрольные группы Σ_4 -кода, смещенные из групп r_1-r_2 в группы $r_1(\text{mod}\mu)-r_2(\text{mod}\mu)$. Когда определяется вычет для одного из чисел r_1 и r_2 , превышающего величину $\mu-1$, то все информационные векторы для группы r_1-r_2 окажутся в группе $r_1(\text{mod}\mu)-r_2(\text{mod}\mu)$. К примеру, в табл. 2 рассмотрена часть распределения информационных векторов для $r_1 < \mu$ (в этом случае $r_1(\text{mod}\mu)=r_1$) и произвольных r_2 . Все информационные векторы в группах r_1-0+i , $r_1-\mu+i$, $r_1-2\mu+i$, ..., $i \in \{0, 1, \dots, \mu-1\}$, Σ_m -кода оказываются в одной контрольной группе Σ_m^μ -кода. Число информационных векторов в контрольной группе равно

$$Q_{r_1-r_2(\text{mod}\mu)} = C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{0+i} + C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{\mu+i} + C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{2\mu+i} \dots + C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{\lfloor m/\mu \rfloor \mu+i}, \quad i \in \{0, 1, \dots, \mu-1\}, \quad (3)$$

либо иначе:

$$Q_{r_1-r_2(\bmod \mu)} = \sum_{j=0}^{j=\lfloor m/\mu \rfloor} C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{j\mu+i}, \quad i \in \{0, 1, \dots, \mu-1\}, \quad (4)$$

Аналогично получается выражение для контрольных групп $r_1(\bmod \mu)=r_2$, $r_2 < \mu$. Для произвольной группы $a-b$ выражение для расчета общего числа информационных векторов имеет следующий вид:

$$Q_{a-b}^* = \sum_{j_1=0, j_2=0}^{j_1=\lfloor m/\mu \rfloor, j_2=\lfloor m/\mu \rfloor} C_m^{j_1\mu+i_1} C_{m-j_1\mu+i_1}^{j_2\mu+i_2}, \quad i_1, i_2 \in \{0, 1, \dots, \mu-1\}, \quad (5)$$

где $i_1 = r_1(\bmod \mu)$ и $i_2 = r_2(\bmod \mu)$.

К примеру, для Σ_4^3 -кода формула (5) дает:

$$Q_{a-b}^* = \sum_{j_1=0, j_2=0}^{j_1=1, j_2=1} C_4^{3j_1+i_1} C_{4-3j_1+i_1}^{3j_2+i_2} = C_4^{i_1} C_{4+i_1}^{i_2} + C_4^{i_1} C_{4+i_1}^{3+i_2} + C_4^{3+i_1} C_{1+i_1}^{i_2} + C_4^{3+i_1} C_{1+i_1}^{3+i_2}, \quad i_1, i_2 \in \{0, 1, 2\}.$$

Для группы 0-1 имеем

$$C_4^0 C_4^1 + C_4^0 C_4^4 + C_4^3 C_4^1 = 1 \cdot 4 + 1 \cdot 1 + 4 \cdot 1 = 9.$$

Первый сомножитель определяет число информационных векторов с сочетанием чисел 0-1, второй – с сочетанием чисел 0-4 и третий – с сочетанием 3-1.

Таблица 2

r_1-r_2												
r_1-0	r_1-1	...	$r_1-\mu-1$	$r_1-\mu$	$r_1-\mu+1$	...	$r_1-2\mu-1$	...	$r_1-\lfloor m/\mu \rfloor \mu$	$r_1-\lfloor m/\mu \rfloor \mu+1$	...	r_1-m
$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^0$	$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^1$	...	$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{\mu-1}$	$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{\mu}$	$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{\mu+1}$	...	$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{2\mu-1}$	...	$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{\lfloor m/\mu \rfloor \mu}$	$C_m^{r_1} C_{m-r_1}^{\lfloor m/\mu \rfloor \mu+1}$	...	$C_m^0 C_m^m$

Вычисления по формулам (1), (2) и (5) позволяют определить общее количество обнаруживаемых ошибок троичными модульными кодами с суммированием. Для расчета числа обнаруживаемых ошибок по кратностям требуется более глубокий анализ.

Процедура анализа табличной формы задания троичных кодов с суммированием была автоматизирована, что позволило определить характеристики обнаружения ошибок Σ_m^- , Σ_m^9 и Σ_m^3 -кодами с длиной информационных векторов $m=3\dots 11$ (табл. 3—5 соответственно). Расчеты с большими значениями m весьма затруднены, так как осуществляется множество сравнений троичных чисел. Несмотря на это, уже по полученным значениям можно установить некоторые закономерности.

Данные в табл. 3—5 получены следующим образом. Для каждого модульного кода с суммированием с заданной длиной информационного вектора сформированы таблицы, содержащие классификацию полного множества информационных векторов по группам контрольных векторов (по аналогии с табл. 1 и 2). Далее определены все возможные переходы информационных векторов друг в друга внутри каждой контрольной группы и вычислены кодовые расстояния между векторами, соответствующие кратностям d необнаруживаемых ошибок. Полученные значения суммировались по каждой контрольной группе и по каждой кратности. В табл. 3—5 для каждого значения m в 1-й строке представлено общее количество необнаруживаемых ошибок модульными кодами с суммированием по кратностям; во 2-й строке — общее количество возможных ошибок каждой кратностью; в 3-й строке указаны доли необнаруживаемых ошибок кратностью d в информационных векторах от общего числа ошибок данной кратностью (величина β_d , %).

Таблица 3

m	d										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	0	54	12	–	–	–	–	–	–	–	–
	162	324	216								
	0	16,66667	5,55556								
4	0	324	144	90	–	–	–	–	–	–	–
	648	1944	2592	1296							
	0	16,66667	5,55556	6,94444							
5	0	1620	1080	1350	360	–	–	–	–	–	–
	2430	9720	19440	19440	7776						
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963						
6	0	7290	6480	12150	6480	2040	–	–	–	–	–
	8748	43740	116640	174960	139968	46656					
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243					
7	0	30618	34020	85050	68040	42840	10080	–	–	–	–
	30618	183708	612360	1224720	1469664	979776	279936				
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082				
8	0	122472	163296	510300	544320	514080	241920	54810	–	–	–
	104976	734832	2939328	7348320	11757312	11757312	6718464	1679616			
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325			
9	0	472392	734832	2755620	3674160	4626720	3265920	1479870	290640	–	–
	354294	2834352	13226976	39680928	79361856	105815808	90699264	45349632	10077696		
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88399		
10	0	1771470	3149280	13778100	22044960	34700400	32659200	22198050	8719200	1588356	–
	1180980	10628820	56687040	198404640	476171136	793618560	906992640	680244480	302330880	60466176	
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88399	2,62685	
11	0	6495390	12990780	64953900	121247280	229022640	269438400	244178550	143866800	52415748	8676360
	3897234	38972340	233834040	935336160	2618941248	5237882496	7482689280	7482689280	4988459520	1995383808	362797056
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88399	2,62685	2,39152

Таблица 4

<i>m</i>	<i>d</i>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	0	54	12	–	–	–	–	–	–	–	–
	162	324	216								
	0	16,66667	5,55556								
	0	324	144								
4	0	324	144	90	–	–	–	–	–	–	–
	648	1944	2592	1296							
	0	16,66667	5,55556	6,94444							
	0	1620	1080	1350							
5	2430	9720	19440	19440	7776	–	–	–	–	–	–
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963						
	0	7290	6480	12150	6480						
	8748	43740	116640	174960	139968	2040					
6	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	–	–	–	–	–
	0	30618	34020	85050	68040	42840					
	30618	183708	612360	1224720	1469664	979776					
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243					
7	0	122472	163296	510300	544320	514080	241920	54810	–	–	–
	104976	734832	2939328	7348320	11757312	11757312	6718464	1679616			
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325			
	0	472392	734832	2755620	3674160	4626720	3265920	1479870			
8	354294	2834352	13226976	39680928	79361856	105815808	90699264	45349632	290646	–	–
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	10077696		
	0	1771470	3149280	13778100	22044960	34700400	32659200	22198050	8719380		
	1180980	10628820	56687040	198404640	476171136	793618560	906992640	680244480	302330880		
9	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405	–	–
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
10	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405	–	–
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
11	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405	–	–
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		
	0	16,66667	5,55556	6,94444	4,62963	4,37243	3,60082	3,26325	2,88405		

Таблица 5

<i>m</i>	<i>d</i>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	0	54	18	–	–	–	–	–	–	–	–
	162	324	216								
	0	16,66667	8,33333								
4	0	324	216	162	–	–	–	–	–	–	–
	648	1944	2592	1296							
	0	16,66667	8,33333	12,5							
5	0	1620	1620	2430	810	–	–	–	–	–	–
	2430	9720	19440	19440	7776						
	0	16,66667	8,33333	12,5	10,41667						
6	0	7290	9720	21870	14580	5346	–	–	–	–	–
	8748	43740	116640	174960	139968	46656					
	0	16,66667	8,33333	12,5	10,41667	11,45833					
7	0	30618	51030	153090	153090	112266	30618	–	–	–	–
	30618	183708	612360	1224720	1469664	979776	279936				
	0	16,66667	8,33333	12,5	10,41667	11,45833	10,9375				
8	0	122472	244944	918540	1224720	1347192	734832	188082	–	–	–
	104976	734832	2939328	7348320	11757312	11757312	6718464	1679616			
	0	16,66667	8,33333	12,5	10,41667	11,45833	10,9375	11,19792			
9	0	472392	1102248	4960116	8266860	12124728	9920232	5078214	1115370	–	–
	354294	2834352	13226976	39680928	79361856	105815808	90699264	45349632	10077696		
	0	16,66667	8,33333	12,5	10,41667	11,45833	10,9375	11,19792	11,06771		
10	0	1771470	4723920	24800580	49601160	90935460	99202320	76173210	33461100	6731586	–
	1180980	10628820	56687040	198404640	476171136	793618560	906992640	680244480	302330880	60466176	
	0	16,66667	8,33333	12,5	10,41667	11,45833	10,9375	11,19792	11,06771	11,13281	
11	0	6495390	19486170	116917020	272806380	600174036	818419140	837905310	552108150	222142338	40271418
	3897234	38972340	233834040	935336160	2618941248	5237882496	7482689280	7482689280	4988459520	1995383808	362797056
	0	16,66667	8,33333	12,5	10,41667	11,45833	10,9375	11,19792	11,06771	11,13281	11,10026

Анализ таблиц позволяет вывести следующую закономерность.

Теорема. Значение показателя β_d , характеризующего долю необнаруживаемых трюичными кодами с суммированием ошибок кратностью d в информационных векторах от общего числа ошибок данной кратностью, не зависит от длины информационного вектора и является постоянным для любого кода с заданным модулем μ .

Эта теорема характеризует как Σ_m -коды, так и Σ_m^μ -коды, однако подтверждается только расчетами и математического доказательства к настоящему времени не имеет.

В табл. 6 представлены значения показателя β_d для трех рассмотренных кодов, а на рис. 1 графически проиллюстрированы зависимости $\beta_d(d)$ для Σ_m^3 - и Σ_m^9 -кодов. Для Σ_m -кодов график не представлен, так как для $d=2\dots 8$ он совпадает с графиком для Σ_m^9 -кодов, а при $d \geq 9$ значения β_d в рассмотренном диапазоне кратностей ошибок отличаются не существенно.

Таблица 6

d	$\beta_d, \%$		
	Σ_m -коды	Σ_m^9 -коды	Σ_m^3 -коды
2	16,66667	16,66667	16,66667
3	5,55556	5,55556	8,33333
4	6,94444	6,94444	12,5
5	4,62963	4,62963	10,41667
6	4,37243	4,37243	11,45833
7	3,60082	3,60082	10,9375
8	3,26325	3,26325	11,19792
9	2,88399	2,88405	11,06771
10	2,62685	2,62774	11,13281
11	2,39152	2,39518	11,10026

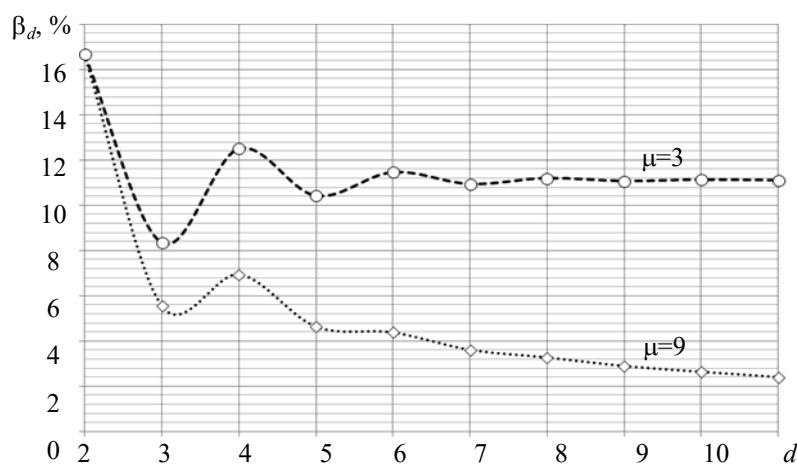


Рис. 1

Для рассматриваемых кодов значения β_2 совпадают (не обнаруживается примерно каждая 6-я двукратная ошибка в информационных векторах); значения же β_3 совпадают только для Σ_m - и Σ_m^9 -кодов (примерно каждая 18-я трехкратная ошибка не будет обнаружена); для Σ_m^3 -кодов примерно каждая 12-я трехкратная ошибка данными кодами не обнаруживается. Для $d \geq 4$ значение показателя β_d находится в диапазоне 10...12 % для Σ_m^3 -кодов и 2...7 % для Σ_m^9 - и Σ_m -кодов.

В отличие от бинарных аналогов [32] значения показателя β_d у трюичных кодов гораздо ниже (ср.: данные табл. 6 с данными для бинарных модульных кодов с суммированием, например из работы [33]). Это объясняется большим количеством информационных векторов

заданной длиной m , строящихся в троичной логике, чем в двоичной логике. Наличие же ошибок нечетной кратностью объясняется используемыми значениями модулей $\mu \in \{3^1, 3^2, \dots, 3^{\lceil \log_3(m+1) \rceil - 1}\}$. В таблице задания кода в одной и той же контрольной группе формируются информационные векторы, для которых $r_1(\text{mod } \mu)$ или $r_2(\text{mod } \mu)$ при разных значениях r_1 или r_2 имеют различную четность.

Рассмотрим еще два показателя обнаружения ошибок троичными кодами с суммированием.

Первый показатель характеризует долю необнаруживаемых ошибок от общего числа ошибок в информационных векторах:

$$\gamma_{m,k} = \frac{N_{m,k}}{N_m} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Второй показатель характеризует близость рассматриваемого кода к коду с наименьшим возможным числом необнаруживаемых ошибок при заданных значениях m и k [34, 35]:

$$\xi_{m,k} = \frac{N_{m,k}^{\min}}{N_{m,k}} \cdot 100 \% = \frac{3^m (3^{m-k} - 1)}{N_{m,k}} \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Чем значение показателя $\gamma_{m,k}$ меньше и ближе к нулю, тем эффективнее код обнаруживает ошибки в информационных векторах; чем значение показателя $\xi_{m,k}$ выше и ближе к 100 %, тем эффективнее в рассматриваемом коде используются контрольные разряды.

В табл. 7 представлены абсолютные показатели обнаружения общего числа ошибок троичными кодами с суммированием, а в табл. 8 — относительные.

Таблица 7

m	N_m	Σ_m -коды		Σ_m^9 -коды		Σ_m^3 -коды	
		$N_{m,k}$	$N_{m,k}^{\min}$	$N_{m,k}$	$N_{m,k}^{\min}$	$N_{m,k}$	$N_{m,k}^{\min}$
3	702	66	—	66	—	72	54
4	6480	558	0	558	0	702	648
5	58806	4410	486	4410	486	6480	6318
6	530712	34440	5832	34440	5832	58806	58320
7	4780782	270648	56862	270648	56862	530712	529254
8	43040160	2151198	524880	2151198	524880	4780782	4776408
9	387400806	17300154	511758	17300160	4763286	43040160	43027038
10	3486725352	140609016	4723920	140609736	42987672	387400806	387361440
11	31380882462	1153285848	42869574	1153319904	387243342	3486725352	3486607254

Таблица 8

m	$\gamma_{m,k}, \%$			$\xi_{m,k}, \%$		
	Σ_m -коды	Σ_m^9 -коды	Σ_m^3 -коды	Σ_m -коды	Σ_m^9 -коды	Σ_m^3 -коды
3	9,40171	9,40171	10,25641	—	—	75
4	8,61111	8,61111	10,83333	0	0	92,30769
5	7,49923	7,49923	11,01928	11,02041	11,02041	97,5
6	6,4894	6,4894	11,08059	16,9338	16,9338	99,17355
7	5,66117	5,66117	11,10095	21,00958	21,00958	99,72527
8	4,99812	4,99812	11,10772	24,39943	24,39943	99,90851
9	4,4657	4,4657	11,10998	2,95811	27,53319	99,96951
10	4,0327	4,03272	11,11073	3,35961	30,57233	99,98984
11	3,67512	3,67523	11,11099	3,71717	33,5764	99,99661

С увеличением длины информационного вектора от $m=3$ к $m=11$ значения показателя $\gamma_{m,k}$ для Σ_m^9 - и Σ_m -кодов уменьшаются от $\approx 9,4\%$ к величине $\approx 3,68\%$, значение же показателя $\gamma_{m,k}$ для Σ_m^3 -кодов возрастает до $11,1\%$ — примерно эта величина является предельной для Σ_m^3 -кодов и равна $\mu^{-2} \cdot 100\%$, для Σ_m^9 -кодов данная величина равна $\mu^{-3} \cdot 100\%$. Особенности изменения показателя $\gamma_{m,k}$ для троичных модульных кодов с суммированием иллюстрируются рис. 2.

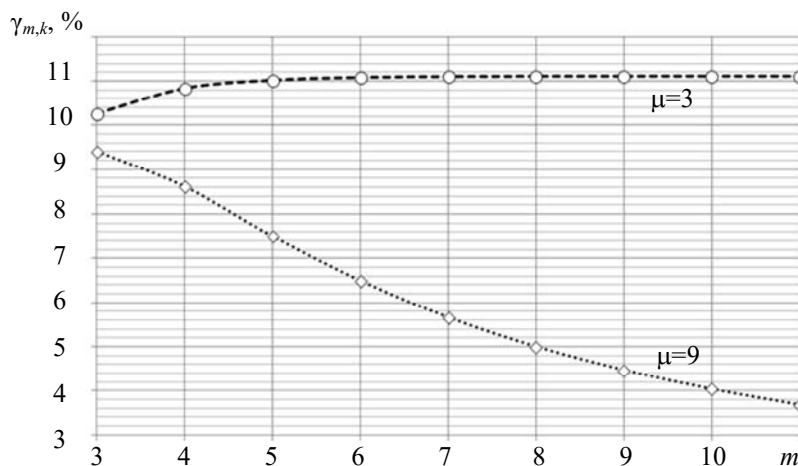


Рис. 2

Анализ величин $\xi_{m,k}$ показывает, что два контрольных разряда Σ_m^3 -кодами значительно эффективнее используются, чем другими кодами с суммированием. Для данных кодов значение $\xi_{m,k}$ уже при $m=6$ превышает 99% . Для Σ_m^9 -кодов показатель $\xi_{m,k}$ от 0 при $m=4$ постепенно увеличивается и достигает значения $\approx 33,6\%$ при $m=11$. С дальнейшим увеличением длины информационного вектора значение показателя $\xi_{m,k}$ возрастает и, так же как и для кода с модулем $\mu=3$, приближается к 100% . Наименее эффективно используются контрольные разряды у Σ_m -кодов: до значения $m=8$ показатель $\xi_{m,k}$ возрастает, однако не превышает и 25% , а после резко падает и далее до $m=11$ не превышает 4% . С увеличением m зависимости сохраняются при каждом новом увеличении числа контрольных разрядов. Самим кодом с суммированием, таким образом, крайне неэффективно используются свои контрольные разряды. Именно поэтому, а также по причине более простой процедуры обеспечения самопроверяемости кодера кода с суммированием (формируется полное множество контрольных векторов) представляется целесообразным использование именно модульных кодов с суммированием при синтезе контролепригодных цифровых устройств и технических средств их диагностирования.

Заключение. При синтезе контролепригодных цифровых схем и технических средств их диагностирования эффективным представляется использование троичных модульных кодов с суммированием, некоторые из которых рассмотрены в настоящей статье. Такие коды, несмотря на малую избыточность, не обнаруживают сравнительно небольшое количество ошибок в информационных векторах.

В ходе исследования получены следующие новые научные результаты:

- сформулированы правила построения троичных модульных кодов с суммированием в троичной несимметричной логике, являющихся аналогами двоичных модульных кодов;
- получена формула расчета общего количества необнаруживаемых ошибок троичными модульными кодами с суммированием;
- экспериментально установлено, что троичные модульные коды с суммированием сохраняют свойство классических двоичных и троичных кодов с суммированием, заключающееся в том, что доля необнаруживаемых ими ошибок кратностью d в информационных век-

торах от общего числа ошибок данной кратностью не зависит от длины информационного вектора и является постоянной величиной.

Это и другие свойства кодов с суммированием целесообразно учитывать при синтезе самопроверяемых и отказоустойчивых цифровых вычислительных устройств и систем.

Дальнейшие исследования особенностей троичных кодов с суммированием могут быть связаны с изучением методов их модификации, направленных на повышение числа обнаруживаемых ошибок как в целом, так и по их видам и кратностям при малой избыточности кода. Например, подобные модификации кодов могут быть получены путем установления неравноправия между разрядами в информационном векторе и использования также модулярной арифметики для получения суммарного значения веса [36].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов М. А., Остиану В. М., Потехин А. И. Надежность дискретных систем // Итоги науки и техники. Сер. Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. 1970. С. 7—104.
2. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
3. Дрозд А. В., Харченко В. С., Антощук С. Г., Дрозд Ю. В., Дрозд М. А., Сулима Ю. Ю. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / Под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского „ХАИ“, 2012. 614 с.
4. Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kacprzyk J. Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures // Springer Book Series „Studies in Systems, Decision and Control“. 2017. Vol. 74. 305 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.
5. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006. 720 p.
6. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008. 184 p.
7. Сагалович Ю. Л. Введение в алгебраические коды. М.: Ин-т проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, 2010. 302 с.
8. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Под ред. Вл. В. Сапожникова. М.: Транспорт, 1995. 272 с.
9. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. N. Y.: Springer International Publishing AG, 2018. 279 p.
10. Kosky P., Balmer R.T., Keat W.D., Wise G. Exploring Engineering: An Introduction to Engineering and Design. Academic Press, 2020. 656 p. DOI: 10.1016/C2017-0-01871-2.
11. Zhuo Y., Li X.-L., Sun Y.-B., Li X.-J., Shi Y.-L., Chen S.-M., Hu S.-J., Guo A. Statistical Variability Analysis in Vertically Stacked Gate All Around FETs at 7 nm Technology // 14th IEEE Intern. Conf. on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), Qingdao, China, 31 Oct. — 3 Nov. 2018. DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8565797.
12. Yoon J.-S., Lee S., Lee J., Jeong J., Yun H., Baek R.-H. Reduction of Process Variations for Sub-5-nm Node Fin and Nanosheet FETs Using Novel Process Scheme // IEEE Trans. on Electron Devices. 2020. Vol. 67, iss. 7. P. 2732—2737. DOI: 10.1109/TED.2020.2995340.
13. Kumar O., Kaur M. Single Electron Transistor: Applications & Problems // Intern. Journal of VLSI Design & Communication Systems. 2010. Vol. 1, iss. 4. P. 240—29. DOI: 10.5121/vlsic.2010.1403.
14. Cambou B., Flikkema P.G., Palmer J., Telesca D., Philabaum C. Can Ternary Computing Improve Information Assurance? // Cryptography. 2018. Vol. 2, iss. 1 P. 1—16. DOI: 10.3390/cryptography2010006.
15. Wu J. Ternary Logic Circuit for Error Detection and Error Correction // Proc. of the 19th Intern. Symp. on Multiple-Valued Logic, Guangzhou, China, 29—31 May, 1989. P. 94—99. DOI: 10.1109/ISMVL.1989.37766.

16. Брусенцов Н. П., Маслов С. П., Рамиль Альварес Х. Микрокомпьютерная система обучения „Наставник“. М.: Наука, 1990. 223 с.
17. Connely J. Ternary Computing Testbed 3-Trit Computer Architecture / California Polytechnic State University of San Luis Obispo, Aug. 2008. 184 p.
18. Kim S., Lim T., Kang S. An Optimal Gate Design for the Synthesis of Ternary Logic Circuits // 23rd Asia and South Pacific Design Automation Conf. (ASP-DAC), Jeju, South Korea, 22—25 Jan. 2018. P. 476—481. DOI: 10.1109/ASPDAC.2018.8297369.
19. Gulliver T. A., Ostergard P. R. J. Improved Bounds for Ternary Linear Codes of Dimension 7 // IEEE Trans. on Information Theory. 1997. Vol. 43, iss. 4. P. 1377—1381. DOI: 10.1109/18.605613.
20. Bitouze N., Graell i Amat A., Rosnes E. Error Correcting Coding for a Nonsymmetric Ternary Channel // IEEE Trans. on Information Theory. 2010. Vol. 56, iss. 11. P. 5715—5729. DOI: 10.1109/TIT.2010.2069211.
21. Laaksonen A., Östergård P. R. J. New Lower Bounds on Error-Correcting Ternary, Quaternary and Quinary Codes // Lecture Notes in Computer Science 10495, Springer: Coding Theory and Applications; 5th Intern. Castle Meeting, ICMCTA 2017, Vihula, Estonia, Aug. 28—31, 2017. P. 228—237.
22. Кодирование информации (двоичные коды) / Н. Т. Березюк, А. Г. Андрущенко, С. С. Моцицкий, В. И. Глушков, М. М. Бенеша, В. А. Гаврилов; Под ред. Н. Т. Березюка. Харьков: Вища школа, 1978. 252 с.
23. Svanström M. A Lower Bound for Ternary Constant Weight Codes // IEEE Trans. on Information Theory. 1997. Vol. 43. P. 1630—1632.
24. Svanström M., Östergård P. R. J., Bogdanova G. T. Bounds and Constructions for Ternary Constant-Composition Codes // IEEE Trans. on Information Theory. 2002. Vol. 48. P. 101—111.
25. Ефанов Д. В. Троичные коды с суммированием и их модификации // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 1. С. 119—125. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-1-119-125.
26. Ефанов Д. В. Троичные коды с суммированием для контроля цифровых схем // Проблемы управления. 2020. № 4. С. 63—71. DOI: 10.25728/ru.2020.4.6.
27. Efanov D. Ternary Sum Codes // Proc. of the 18th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2020), Varna, Bulgaria, Sept. 4—7, 2020. P. 92—99. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9225033.
28. Ефанов Д. В. Ошибки в троичных кодовых векторах, их классификация и обнаружение с помощью помехозащищенного кодирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 391—404. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-391-404.
29. Efanov D. Classification of Errors in Ternary Code Vectors from the Standpoint of Their Use in the Synthesis of Self-Checking Digital Systems // Proc. of the 18th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2020), Varna, Bulgaria, Sept. 4-7, 2020. P. 40—46. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224826.
30. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1974. 368 с.
31. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. 2010. № 6. С. 155—162.
32. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика и телемеханика. 2015. № 10. С. 152—169.
33. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1. Классические коды Бергера и их модификации. М.: Наука, 2020. 383 с.
34. Ефанов Д. В. Троичный код паритета в системах рабочего диагностирования устройств автоматики и вычислительной техники // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 7. С. 426—434. DOI: 10.17587/it.25.426-434.
35. Efanov D. V. Ternary Parity Codes: Features // Proc. of the 17th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, Sept. 13—16, 2019. P. 315—319. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884414.
36. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2. Взвешенные коды с суммированием. М.: Наука, 2021. 455 с.

Дмитрий Викторович Ефанов

Сведения об авторе

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

Поступила в редакцию 04.11.21; одобрена после рецензирования 20.12.21; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Gavrilov M.A., Ostianu V.M., Potekhin A.I. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya „Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika“* (Results of Science and Technology. Series „Probability Theory. Math Statistics. Theoretical Cybernetics“), 1969, 1970, pp. 7–104. (in Russ.)
2. Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivye sistemy* (The Self-Checked Devices and Failure-Safe Systems), Moscow, 1989, 208 p. (in Russ.)
3. Drozd A.V., Kharchenko V.S., Antoshchuk S.G., Drozd Yu.V., Drozd M.A., Sulima Yu.Yu. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* (Working Diagnostics of Safe Information and Control Systems), Khar'kov, 2012, 614 p. (in Russ.)
4. Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kacprzyk J. *Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures*, Springer Book series "Studies in Systems, Decision and Control", 2017, vol. 74, 305 p., DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.
5. Fujiwara E. *Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications*, John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
6. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking*, Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
7. Sagalovich Yu.L. *Vvedeniye v algebraicheskiye kody* (Introduction to Algebraic Codes) Moscow, 2010, 302 p. (in Russ.)
8. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Khristov Kh.A., Gavzov D.V. *Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki* (Methods of Construction of Safe Microelectronic Systems of Railway Automation), Moscow, 1995, 272 p. (in Russ.)
9. Hahanov V. *Cyber Physical Computing for IoT-driven Services*, NY, Springer International Publishing AG, 2018, 279 p.
10. Kosky P., Balmer R.T., Keat W.D., Wise G. *Exploring Engineering: An Introduction to Engineering and Design*, Academic Press, 2020, 656 p., <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01871-2>.
11. Zhuo Y., Li X.-L., Sun Y.-B., Li X.-J., Shi Y.-L., Chen S.-M., Hu S.-J., Guo A. *2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, 31 Oct.–3 Nov. 2018, Qingdao, China, DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8565797.
12. Yoon J.-S., Lee S., Lee J., Jeong J., Yun H., Baek R.-H. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, no. 7(67), pp. 2732–2737, DOI: 10.1109/TED.2020.2995340.
13. Kumar O., Kaur M. *International Journal of VLSI Design & Communication Systems*, 2010, no. 4(1), pp. 240–249, DOI: 10.5121/vlsic.2010.1403.
14. Cambou B., Flikkema P.G., Palmer J., Telesca D., Philabaum C. *Cryptography*, 2018, no. 1(2), pp. 1–16, DOI: 10.3390/cryptography2010006.
15. Wu J. *Proceedings of 19th International Symposium on Multiple-Valued Logic*, 29–31 May 1989, Guangzhou, China, pp. 94–99, DOI: 10.1109/ISMVL.1989.37766.
16. Brusentsov N.P., Maslov S.P., Ramil' Al'vares Kh. *Mikrokompyuternaya sistema obucheniya „Nastavnik“* (Microcomputer Training System "Mentor"), Moscow, 1990, 223 p. (in Russ.)
17. Connely J. *Ternary Computing Testbed 3-Trit Computer Architecture*, California Polytechnic State University of San Luis Obispo, August 29th, 2008, 184 p.
18. Kim S., Lim T., Kang S. *23rd Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, 22–25 January 2018, Jeju, South Korea, pp. 476–481, DOI: 10.1109/ASP-DAC.2018.8297369.
19. Gulliver T.A., Ostergard P.R.J. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1997, no. 4(43), pp. 1377–1381, DOI: 10.1109/18.605613.
20. Bitouze N., Graell i Amat A., Rosnes E. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, no. 11(56), pp. 5715–5729, DOI: 10.1109/TIT.2010.2069211.
21. Laaksonen A., Östergård P.R.J. *Lecture Notes in Computer Science 10495*, Springer: Coding Theory and Applications, 5th International Castle Meeting, ICMCTA 2017, Vihula, Estonia, August 28–31, 2017, pp. 228–237.
22. Berezyuk N.T., Andrushchenko A.G., Moshchitskiy S.S., Glushkov V.I., Benesha M.M., Gavrilov V.A. *Kodirovaniye informatsii (dvoichnyye kody)* (Information Coding (Binary Codes)), Khar'kov, 1978, 252 p. (in Russ.)
23. Svanström M. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1997, vol. 43, pp. 1630–1632.
24. Svanström M., Östergård P.R.J., Bogdanova G.T. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, vol. 48, pp. 101–111.
25. Efanov D.V. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)*, 2020, no. 1, pp. 119–125, DOI: 10.31114/2078-7707-2020-1-119-125. (in Russ.)

26. Efanov D.V. *Control sciences*, 2020, no. 4, pp. 63–71, DOI: 10.25728/pu.2020.4.6. (in Russ.)
27. Efanov D. *Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2020)*, Varna, Bulgaria, September 4–7, 2020, pp. 92–99, DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9225033.
28. Efanov D.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 5(63), pp. 391–404, DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-391-404.
29. Efanov D. *Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2020)*, Varna, Bulgaria, September 4–7, 2020, pp. 40–46, DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224826.
30. Pospelov D.A. *Logicheskiye metody analiza i sinteza skhem* (Logical Methods of Analysis and Synthesis of Circuits), Moscow, 1974, 368 p. (in Russ.)
31. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Automation and Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 1117–1123.
32. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V. *Automation and Remote Control*, 2015, no. 10, pp. 1834–1848.
33. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 1. Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii* (Summed Codes for Technical Diagnostic Systems. Vol. 1. Classical Berger Codes and Their Modifications), Moscow, 2020, 383 p. (in Russ.)
34. Efanov D.V. *Information Technologies*, 2019, no. 7(25), pp. 426–434, DOI: 10.17587/it.25.426-434. (in Russ.)
35. Efanov D.V. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 315–319, DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884414.
36. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 2. Vzveshennyye kody s summirovaniyem* (Summed Codes for Technical Diagnostic Systems. Vol. 2. Weighted Codes with Summation), Moscow, 2021, 455 p. (in Russ.)

Data on author

Dmitry V. Efanov

— Dr. Sci., Associate Professor; Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control, and Communications on Railway Transport; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Transport of the Institute of Machinery, Materials, and Transport; Professor;
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Received 04.11.21; approved after reviewing 20.12.21; accepted for publication 29.03.22.

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
И НАСТРОЙКА СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ОДНОЗАПРОСНЫХ ПЛАНИРОВЩИКОВ ТРАЕКТОРИЙ

А. ЖАРУХ, С. А. КОЛЮБИН*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*s.kolyubin@itmo.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования производительности планировщиков движения, основанных на выборке одного запроса, для различной кинематики манипуляционных роботов и характеристик окружающей среды. Анализ проводился применительно к задачам поиска пути в многомерном конфигурационном пространстве. Проанализированы однонаправленные и двунаправленные планировщики по их чувствительности к изменению значений двух ключевых статических параметров: Range и Goal-Bias. Показано, что имеют место либо минимальные пороговые, либо оптимальные значения каждого из рассмотренных параметров, существенно отличающиеся для каждого алгоритма планирования, но практически инвариантные к кинематике и степени заполнения окружения робота препятствиями. Предложены рекомендации по настройке статических параметров планировщиков.

Ключевые слова: планирование движения, планировщики на основе выборки, кратчайший путь, манипуляционные роботы

Ссылка для цитирования: Жарух А., Колубин С. А. Анализ производительности и настройка статических параметров однозапросных планировщиков траекторий // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 323—334. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-323-334.

PERFORMANCE ANALYSIS AND STATIC
PARAMETERS SETTING OF SINGLE-QUERY TRAJECTORY PLANNERS

A. Jaroukh, S. A. Kolyubin *

ITMO University, St. Petersburg, Russia

*s.kolyubin@itmo.ru

Abstract. Results of a study of the of motion planner performance based on single query sample of a for various kinematics of robotic manipulators and environmental characteristics are presented. The analysis is carried out in relation to the problems of finding a path in a multidimensional configuration space. Unidirectional and bidirectional planners are analyzed according to their sensitivity to changes in the values of two key static parameters: Range and Goal-Bias. It is shown that there are either minimal threshold or optimal values of each of the parameters considered, which differ significantly for various planning algorithms, but are practically invariant to the kinematics and the degree of filling of the robot environment with obstacles. Recommendations on tuning the considered static parameters of the planners are proposed.

Keywords: motion planning, sample-based planners, shortest path, robotic manipulators

For citation: Jaroukh A., Kolyubin S. A. Performance analysis and static parameters setting of single-query trajectory planners. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 5. P. 323—334 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-323-334.

Введение. С появлением антропоморфных роботов и коллаборативных манипуляторов с большим числом степеней свободы, зачастую избыточной кинематики, которые должны перемещаться в загроможденном пространстве избегая столкновений, выросла значимость алгоритмов планирования движения в многомерном конфигурационном пространстве сложной топологии. Одним из подходов, успешно применяемых для решения этих задач, являются планировщики движения на основе выборки, например, на основе метода быстроисследующих случайных деревьев. При этом актуальны способы повышения производительности подобных планировщиков, которая выражается в проценте успешных попыток планирования и скорости планирования, близкой к работе в реальном времени, без ухудшения оптимальности найденных решений по заданному критерию, например минимизации длины пути. Попытки обобщения характеристик планировщиков на основе выборки были предприняты, в частности, в работе [1]. Это исследование проводилось для трех манипуляторов различной кинематики в трех различных окружающих средах, чтобы дать интуитивное представление, какой планировщик в каких условиях стоит использовать.

В целом, повышение производительности планировщиков является нетривиальной задачей, так как для каждого конкретного алгоритма зависит от настройки существенного числа параметров. С другой стороны, существует этап предварительного планирования, когда могут быть определены значения параметров планировщиков. Однако этот процесс может занимать много времени, а его эффект в части повышения производительности планировщиков существенно варьируется в зависимости от специфики алгоритма.

В настоящей статье решается задача более системного анализа производительности планировщиков как функции статических параметров для разной кинематики манипуляторов, размерности конфигурационного пространства и топологии свободного рабочего пространства.

В открытой библиотеке планирования движения OMPL [2] существует 17 однозапросных планировщиков, которые интегрированы в популярный фреймворк для планирования движения роботов MoveIt! [3]. При этом для 14 из них используется параметр Range, а для 8 — два параметра: Range и Goal-Bias (смысл этих параметров подробно объясняется далее). Эти параметры известны как очень эффективные [2], поэтому именно они и рассматриваются в данной работе.

Для полноты и наглядности исследования был проведен анализ планировщиков на примере пространственных манипуляторов полной кинематики с 6 степенями свободы и избыточной кинематики с 7 степенями свободы, работающих в трех различных средах: с низким, средним и высоким уровнем заполнения пространства препятствиями. Проведенный анализ позволяет решить, какой характер зависимости производительности от вариации этих параметров имеют различные планировщики и как следует организовать процедуру настройки параметров для увеличения производительности за кратчайшее время. Более того, данное исследование закладывает основу для разработки метода и алгоритмов автоматической калибровки планировщиков, когда значимые параметры настраиваются в процессе работы.

Обзор планировщиков движения. Планировщики на основе выборки являются вероятностно полными, т.е. алгоритм находит по крайней мере одно выполнимое решение после достаточного количества итераций, и асимптотически оптимальными, т.е. алгоритм после длительного времени находит глобальное оптимальное решение данного запроса.

Задача глобального однозапросного планирования состоит в том, чтобы найти путь от начального состояния (конфигурации или положения центральной инструментальной точки манипулятора) в заданное целевое состояние в статичном окружении. При этом однозапросный планировщик находит решение без сохранения промежуточных состояний из предыдущих запросов.

Приведем краткую характеристику наиболее распространенных современных глобальных однозапросных планировщиков движения на основе выборки, применяемых для поиска пути в конфигурационном пространстве CS .

Один из них — планировщик на основе метода быстроисследующих случайных деревьев (Rapidly Exploring Random Trees — RRT) [4], генерирующий в свободном конфигурационном пространстве робота CS_{free} случайные точки, соответствующие определенным сочетаниям значений обобщенных координат, начиная с начального состояния в направлении неисследованных областей. Генерируемые точки (сэмплы) представляют собой узлы, которые соединяются друг с другом ребрами, образуя древовидную структуру. Добавление новых сэмплов в дерево прекращается, как только дерево достигает узла, соответствующего целевой конфигурации робота.

Известен также ряд модификаций исходного RRT-планировщика. RRTConnect [5] — это двунаправленная версия RRT, где генерируются два дерева: одно из начального состояния, а другое из целевого. На каждой итерации алгоритм проверяет, могут ли эти два дерева быть соединены, и как только это происходит, решение считается найденным. Версия планировщика RRT* [6] добавляет шаг оптимизации на каждой итерации планирования для повторного соединения ранее сгенерированных вершин по критерию наименьших затрат. Планировщик с нижней границей LBT-RRT [7] использует коэффициент аппроксимации ϵ при генерации дерева поиска. Его производительность варьируется между RRT* при $\epsilon=0$ и RRT при $\epsilon=1$. Оба планировщика RRT* и LBT-RRT расходуют оставшееся допустимое время планирования на уточнение существующего решения. Трансляционное RRT (TRRT) [8] оптимизирует путь с точки зрения минимальной механической работы на соответствующее перемещение. Этот планировщик применяет тест перехода к новым сэмплам, чтобы добавить или отклонить их. Также известная двунаправленная версия планировщика TRRT — BiTRRT [9].

Кинодинамическое планирование движения путем исследования внутренних и внешних ячеек KPIECE [10] — это древовидный планировщик, оценивающий охват конфигурационного пространства с помощью слоев дискретизации на основе сетки. Такой подход позволяет уменьшить необходимый объем используемой при планировании памяти. Более того, этот планировщик выбирает новое состояние из предыдущего через управляющее воздействие, которое применяется в течение определенного времени на симуляторе робота. Такой способ планирования увеличивает точность, поскольку физические симуляторы учитывают динамические свойства робота. BKPIECE — это двунаправленная версия описанного планировщика, а LBKPIECE — тот же двунаправленный планировщик с „ленивой“ проверкой столкновений (lazy collision checking).

Расширенный пространственный планировщик EST [11], основанный на деревьях, стремится направить новые выборки в неисследованные области, которые имеют меньшую плотность выборки. BiEST — это двунаправленная версия EST, тогда как ProjEST пытается обнаружить менее исследованные области через сетку, созданную проекцией конфигурационного пространства.

Однозапросный двунаправленный вероятностный планировщик дорожных карт с ленивой проверкой столкновений SBL [12] имеет ту же стратегию расширения, что и EST. Он использует структуру данных сетки для проектирования пространства состояний, а расширение деревьев происходит в наименее заполненных ячейках сетки. Когда это возможно, планировщик соединяет два дерева без проверки того, гарантирует ли найденный путь отсутствие столкновений (ленивая проверка). Если же сгенерированный путь приводит к столкновениям, соответствующие вершины и переходы между ними будут удалены, а расширение дерева поиска продолжится.

Быстрое маршрутирующее дерево FMT [13] — асимптотически оптимальный планировщик, предназначенный для решения задач поиска пути в многомерном конфигурационном пространстве и использующий метод оптимизации „затраты-выпуск“ при генерации дерева с заданным количеством сэмплов. Планировщик BFMT представляет собой двунаправленную версию FMT.

Дерево направленного деления пути PDST [14] — это алгоритм, который осуществляет планирование посредством построения сегментов пути, а не генерирования отдельных конфигураций робота. Он обнаруживает менее исследованные области в конфигурационном пространстве, используя двоичное разбиение пространства состояний.

Поисковое дерево с независимой от разрешения оценкой плотности STRIDE [15] — это планировщик движения на основе исследующих деревьев, который обнаруживает менее изученные области конфигурационного пространства, используя структуру данных ближайших соседей GNAT.

Анализ параметров планировщиков. Процесс работы каждого планировщика зависит от значений ряда внутренних параметров. Часть из них относится к *динамическим параметрам*, которые автоматически настраиваются во время выполнения алгоритма; к ним, например, относится параметр температуры в планировщиках TRRT и BiTRRT [8, 9]. При этом другие параметры являются *статическими*, значения которых должны быть установлены до начала процесса планирования. Именно на анализе их влияния на работу планировщиков сосредоточено данное исследование.

Все однозапросные планировщики можно разделить на группы или семейства в зависимости от базового принципа их работы, находящего отражение в используемых уникальных параметрах: семейство KPIECE, семейство RRT, семейство EST и т.д. Как правило, для каждого семейства приводятся рекомендации по выбору некоторых подходящих значений статических параметров, однако их оптимальность для конкретного робота и его окружения остается открытым вопросом.

За исключением алгоритмов PDST, FMT и BFMT, все однозапросные планировщики имеют два общих статических параметра: Range, который выражает максимальную длину сегмента, добавляемого в дерево поиска пути, и Goal-Bias, который соответствует вероятности случайного выбора целевой конфигурации в качестве вершины дерева поиска на каждой итерации. Несмотря на то, что эти два параметра сильно влияют на производительность алгоритмов планирования [2], более детальному их анализу не было уделено достаточного внимания. Для иллюстрации на рис. 1 показано, насколько заметно изменяется плотность узлов, которые были выбраны при поиске траектории, при изменении значения всего лишь одного параметра: *a* — при произвольном значении Range-параметра, *b* — при настроенном значении Range-параметра.

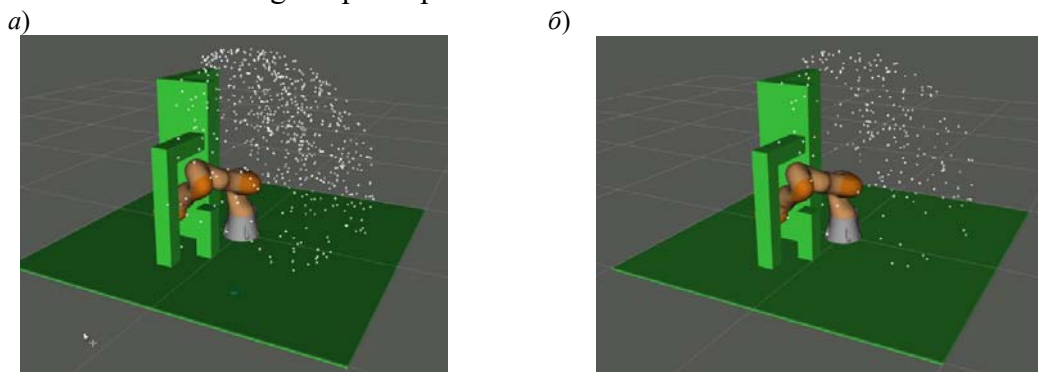


Рис. 1

В настройках OMPL [2] также есть важные *глобальные параметры*, которые необходимы для всех планировщиков, основанных на выборке. Глобальные параметры не нуждаются

в настройке, однако их значения необходимо установить в зависимости от желаемого оптимизационного критерия.

Одним из глобальных параметров является Longest-Valid-Segment-Fraction, который выражает максимально допустимую длину траектории без выполнения проверки столкновений. Необходимо подчеркнуть разницу между этим параметром и статическим параметром Range. Параметр Range можно рассматривать как максимально допустимое расстояние (длину ребра) между текущей и генерируемой вершинами в дереве поиска, а Longest-Valid-Segment-Fraction — это максимальная длина сегмента ребра (определяется как пропорция от общего размера конфигурационного пространства, в которой осуществляется поиск), при которой на промежуточных итерациях не осуществляется проверка столкновений. Увеличение значения Longest-Valid-Segment-Fraction уменьшает время планирования, но снижает безопасность найденных траекторий. В описываемых далее экспериментах для получения достоверных данных значение Longest-Valid-Segment-Fraction принято равным 0,005.

Другим важным глобальным параметром является Projection Evaluator, который используется планировщиками для оценки покрытия пространства поиска через проекцию на конфигурационное пространство более низкой размерности CS_{proj} [10—12]. Чем выше размерность CS_{proj} , тем точнее оценка покрытия CS , однако опытным путем было установлено, что время планирования увеличивается экспоненциально с ростом размерности CS_{proj} . Поэтому была выбрана размерность CS_{proj} , равная двум, и задан параметр Projection Evaluator на первое и второе сочленение (рассматривается робот артикулированной кинематики).

Наконец, глобальный параметр Optimization Objective определяет критерий оптимизации для планировщика. Этот параметр был установлен в значение Mechanical-Work-Optimization-Objective — минимизация затрат механической энергии на перемещение, так как он одновременно с минимизацией длины траектории приводит к генерации более естественных траекторий [9].

Экспериментальные исследования. Робот-манипулятор. Производительность разных планировщиков была проанализирована на примере задачи планирования движения коллаборативного манипулятора последовательной кинематики KUKA LBR IIWA 14 R820 [16]; его модель с обозначением осей вращения показана на рис. 2.

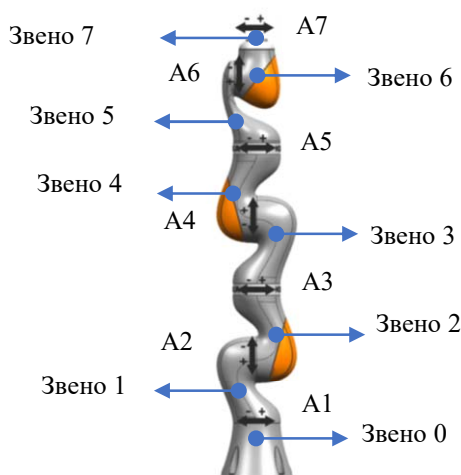


Рис. 2

Рассматривались два варианта:

— избыточная кинематика, когда в движение приводятся все 7 сочленений робота и, соответственно, размерность конфигурационного пространства, в котором осуществляется планирование, равна 7;

— полная кинематика с той же геометрией робота и движением только по 6 осям; вариант полной кинематики был получен путем ограничения движения („заморозки“) третьего сочленения (А3) робота.

Характеристики окружающей среды. Чтобы выяснить, как изменение окружения влияет на выбор оптимальных значений параметров планировщиков, в ходе исследования были использованы три типа окружения: слабо, средне и сильно загроможденные среды. Слабо загроможденная среда характеризуется тем, что манипулятор имеет свободное пространство вокруг начального положения и загроможденное пространство (заполненное объектами, с которыми необходимо избежать столкновения) около целевого положения. Эта модель окружения показана на рис. 3, а (3D-представление), а топология свободного пространства (без столкновений) в проекции относительно обобщенных координат первого, второго и четвертого сочленений (θ_1 , θ_2 , θ_4 — талии, плеча и локтя) — на рис. 3, б и в. Подобная проекция позволяет представить изменение конфигураций манипулятора как движение точки в трехмерном пространстве. Плотность свободного пространства CS_{free} по этой проекции составляет 84 %. Напомним, что поставленная задача планирования движения решается в конфигурационном пространстве размерности 7 или 6, а приведенная проекция — лишь способ доступной визуализации.

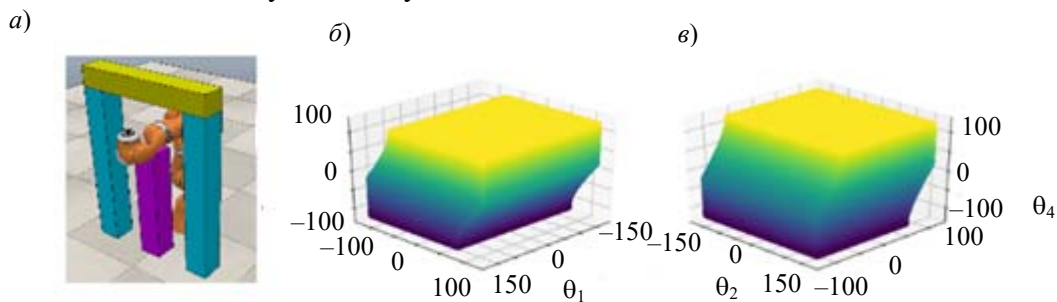


Рис. 3

Средне загроможденная среда характеризуется тем, что и при начальном, и при целевом положениях имеются в равной степени заполненные препятствиями пространства, а в средней области между двумя крайними положениями имеется свободное связанное подпространство. Это означает, что робот будет частично свободен для перемещения в некоторых областях своего конфигурационного пространства. На рис. 4, а показана модель такой среды, а топология свободного пространства в проекции относительно обобщенных координат первого, второго и четвертого сочленений показана на рис. 4, б и в. Плотность свободного пространства CS_{free} в этой проекции составляет 37 %.

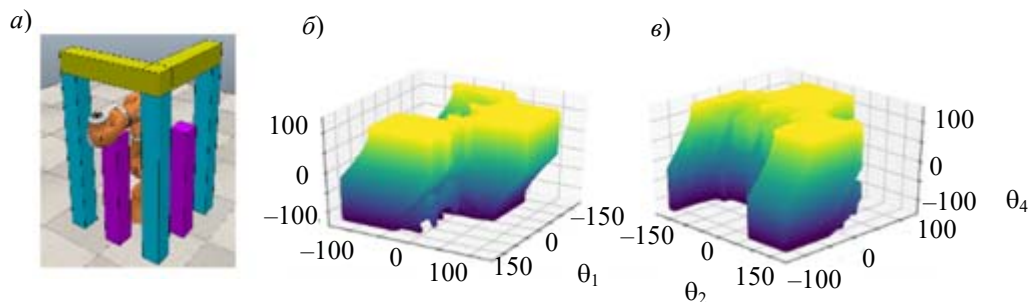


Рис. 4

В сильно загроможденной среде препятствия имеются на всем пути от начального положения до целевого. В этой модели отсутствуют большие участки связанного конфигурационного подпространства, где новые сэмплы могут генерироваться и свободно соединяться

друг с другом без риска столкновений. Эта модель показана на рис. 5, а, а топология свободного пространства в проекции относительно обобщенных координат первого, второго и четвертого сочленений — на рис. 5, б и в. Плотность свободного пространства CS_{free} в этой проекции составляет всего 8 %.

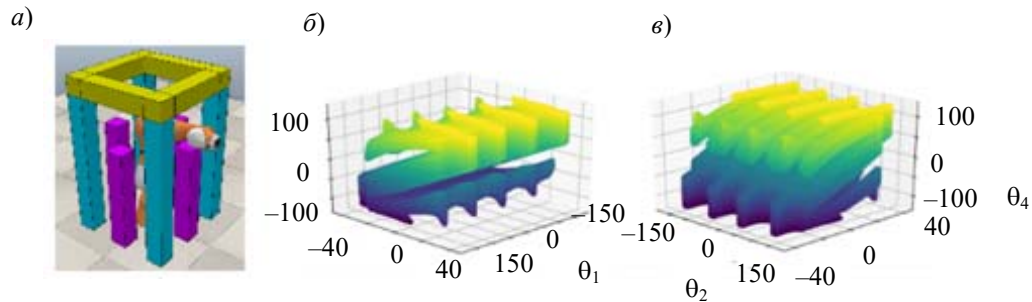


Рис. 5

Программное обеспечение. Исследование было выполнено с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом Robot Operating System [17] с использованием фреймворка MoveIt! и алгоритмов из открытой библиотеки OMPL. В MoveIt! решение, найденное планировщиком из OMPL, далее сглаживается с помощью стандартного процесса упрощения пути.

Эксперименты проводились в симуляторе RViz с использованием однопоточных вычислений на персональном компьютере с процессором Intel i5 2.3 ГГц и 8 Гбайт оперативной памяти. Максимально допустимое время планирования для всех запусков было установлено на 10 с.

Оценка производительности планировщиков. Для каждого планировщика и двух различных вариантов кинематики робота в каждой из трех predetermined сред при каждом фиксированном значении анализируемого параметра (Range и Goal-Bias) было выполнено по 100 запусков алгоритма планирования движения. На основе полученных данных были рассчитаны средние значения метрик производительности: времени планирования и длины пути для успешных запусков, а также процент таковых.

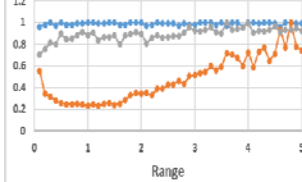
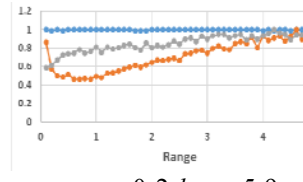
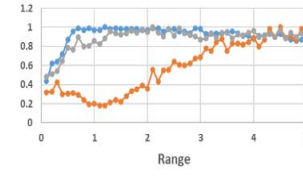
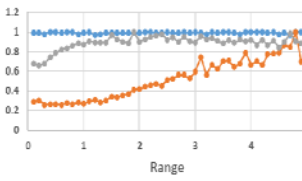
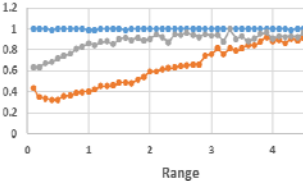
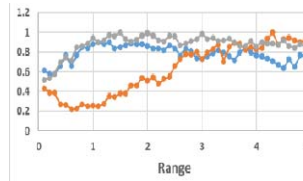
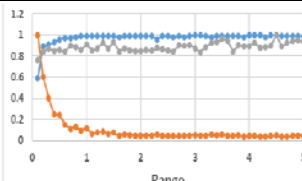
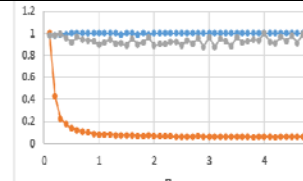
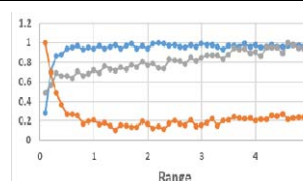
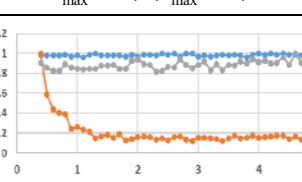
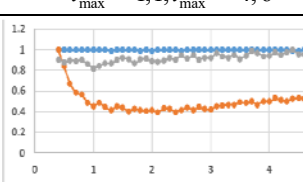
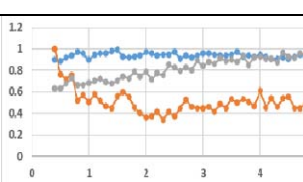
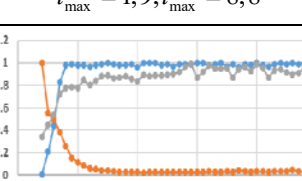
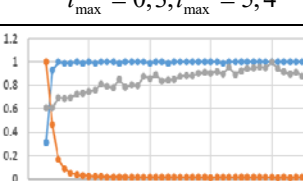
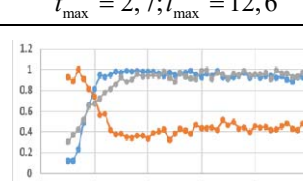
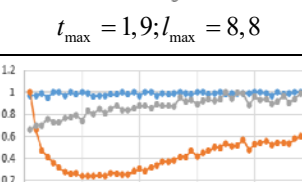
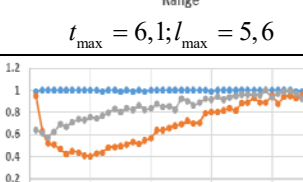
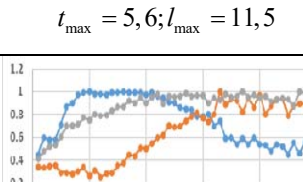
Параметр Range варьировался в диапазоне $[0,1 \rightarrow 5]$ с шагом 0,1. Значения выше 5 были также протестированы, но ни для одного из планировщиков не показали изменения производительности, поэтому не представлены в данной работе. Параметр Goal-Bias варьировался в трех различных диапазонах: $[0,005 \rightarrow 0,25]$ с шагом 0,005, затем $[0,3 \rightarrow 0,5]$ с шагом 0,02, и наконец $[0,5 \rightarrow 1,0]$ с шагом 0,1.

Полученные результаты. Результаты оценки производительности планировщиков как функции от параметров Range и Goal-Bias представлены в табл. 1 и 2 соответственно, где оранжевый цвет — время планирования (t), серый — длина траектории (l), синий — доля удачных запусков. Чтобы показать зависимости для трех различных показателей на одном рисунке, графики были нормированы по максимальному значению (эти значения приведены на графиках в таблицах). Доля успешных запусков измерена в диапазоне от 0 до 1 (100 %).

Range-параметр. Табл. 1 иллюстрирует изменение производительности планировщиков в зависимости от параметра Range для манипулятора полной и избыточной кинематики в средне и сильно загроможденных средах. Приведены результаты только для двунаправленных планировщиков, поскольку однонаправленные показали несистематические результаты, так что процесс настройки параметра Range для них не приводит к значительному повышению производительности.

Как видно из графиков, при низких значениях Range все планировщики работают относительно плохо, так как низкие значения заставляют дерево выборов двигаться медленно (маленькими шагами), когда оно исследует пространство состояний.

Таблица 1

Алгоритм планирования	Избыточная кинематика, средне загроможденная среда	Полная кинематика, средне загроможденная среда	Избыточная кинематика, сильно загроможденная среда
BKPIECE	 $t_{\max} = 0,6; l_{\max} = 8,8$	 $t_{\max} = 0,2; l_{\max} = 5,9$	 $t_{\max} = 4; l_{\max} = 12,7$
LBKPIECE	 $t_{\max} = 0,8; l_{\max} = 9,4$	 $t_{\max} = 0,3; l_{\max} = 5,9$	 $t_{\max} = 5,3; l_{\max} = 11,4$
RRTConnect	 $t_{\max} = 4,5; l_{\max} = 8,3$	 $t_{\max} = 1,1; l_{\max} = 4,6$	 $t_{\max} = 6,1; l_{\max} = 11,6$
BiTRRT	 $t_{\max} = 1,9; l_{\max} = 8,8$	 $t_{\max} = 0,3; l_{\max} = 5,4$	 $t_{\max} = 2,7; l_{\max} = 12,6$
BiEST	 $t_{\max} = 1,9; l_{\max} = 8,8$	 $t_{\max} = 6,1; l_{\max} = 5,6$	 $t_{\max} = 5,6; l_{\max} = 11,5$
SBL	 $t_{\max} = 0,7; l_{\max} = 8,8$	 $t_{\max} = 0,2; l_{\max} = 5,7$	 $t_{\max} = 7,2; l_{\max} = 11,9$

Планировщики, использующие грид-структуру данных для проектирования пространства состояний (BKPIECE, LBKPIECE, SBL, BiEST), как правило, имеют оптимальное значение Range (глобальный оптимум), при котором производительность планировщика характеризуется идеальным сочетанием доли успешных запусков, времени планирования и длины траектории. При высоких значениях Range время планирования заметно увеличивается, что, вероятно, связано с тем, что в этом случае планировщики проходят дальше (к границе конфигурационного пространства) в поисках областей с низкой плотностью выборки, и это может замедлять соеди-

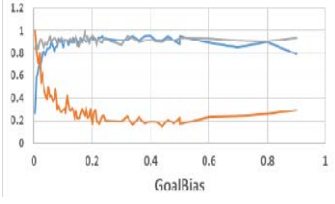
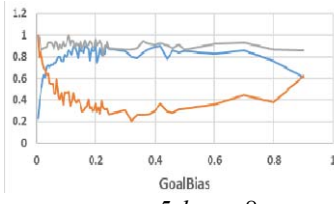
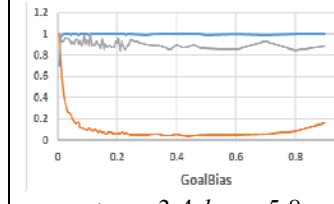
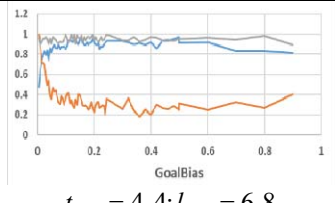
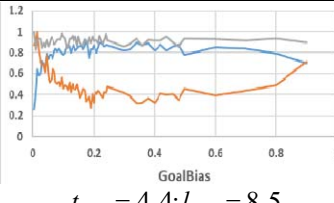
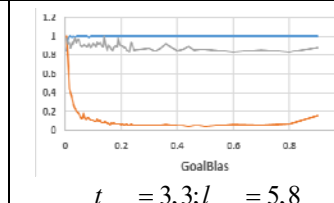
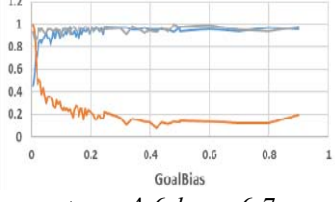
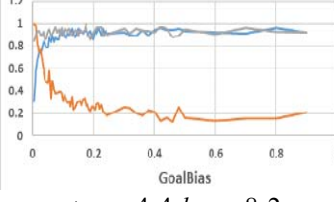
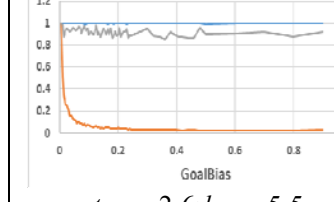
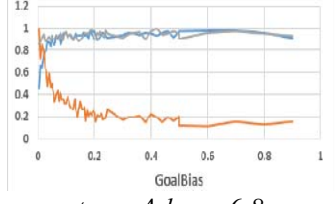
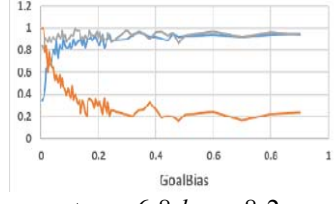
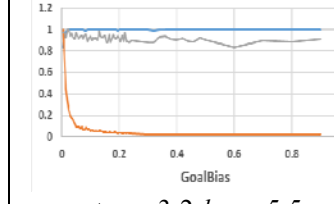
нение двунаправленных деревьев. Также планировщики SBL и LBKPIECE используют ленивую проверку столкновений (проводится только после построения полного пути), поэтому в сильно загроможденной среде большие шаги поиска (большие значения Range) приводят к тому, что существенная доля найденных планировщиком промежуточных решений впоследствии будет исключена.

RRTConnect и BiTRRT имеют одну цель — соединить два дерева (в дополнение к шагу оптимизации в BiTRRT). Напомним, что при генерации сэмплов добавляются промежуточные вершины между текущей крайней вершиной дерева и следующей случайной в пределах шага, задаваемого параметром Longest-Valid-Segment-Fraction. Благодаря этой методике можно предположить, что после порогового значения Range производительность планировщика не изменится, и два двунаправленных дерева будут находить путь друг к другу одинаковым образом.

Следует отметить, согласно анализу табл. 1, что изменение среды не влияет на оптимальное значение параметра Range. Более того, редуцирование числа степеней подвижности манипулятора (меньшая размерность конфигурационного пространства) не требует перенастройки этого параметра.

Параметр Goal-Bias. В табл. 2 представлены результаты работы планировщиков в зависимости от параметра Goal-Bias, когда задача планирования движения применялась к манипулятору избыточной кинематики в средах с низкой и средней плотностью препятствий, а также к манипулятору полной кинематики в средне загроможденной среде. Приведены результаты для однонаправленных планировщиков, за исключением RRT, TRRT, RRT* и LBTRRT, поскольку эти планировщики показали несистематические результаты, так что настройка параметра Goal-Bias не приводит к значительному повышению производительности.

Таблица 2

Алгоритм планирования	Избыточная кинематика, слабо загроможденная среда	Избыточная кинематика, средне загроможденная среда	Полная кинематика, средне загроможденная среда
KPIECE	 $t_{\max} = 4,5; l_{\max} = 6,6$	 $t_{\max} = 5,5; l_{\max} = 8$	 $t_{\max} = 3,4; l_{\max} = 5,8$
STRIDE	 $t_{\max} = 4,4; l_{\max} = 6,8$	 $t_{\max} = 4,4; l_{\max} = 8,5$	 $t_{\max} = 3,3; l_{\max} = 5,8$
EST	 $t_{\max} = 4,6; l_{\max} = 6,7$	 $t_{\max} = 4,4; l_{\max} = 8,2$	 $t_{\max} = 2,6; l_{\max} = 5,5$
ProjEST	 $t_{\max} = 4; l_{\max} = 6,8$	 $t_{\max} = 6,8; l_{\max} = 8,2$	 $t_{\max} = 3,2; l_{\max} = 5,5$

Анализ производительности по параметру Goal-Bias показывает, что целесообразно половину случайных сэмплов генерировать в целевом положении в конфигурационном пространстве (Goal-Bias = 0,5). Это не согласуется со значением Goal-Bias $\approx 0,05$, как рекомендуется в [2]. Разница заключается в том, что для манипуляторов с фиксированной базой пространство поиска пути значительно меньше, чем для движущегося в лабиринте мобильного робота, рассматриваемого в [2].

Заключение. Проанализированы характеристики планировщиков движения, основанных на выборке одного запроса, в зависимости от параметров Range и Goal-Bias с использованием манипулятора ПВА в избыточной (7 степеней свободы) и в полной (6 степеней свободы) кинематике. Построены графики эффективности планирования, времени планирования и длины пути при изменении значений параметров в заданных диапазонах. Каждая точка на графиках определялась как среднее значение соответствующей величины на основе 100 запусков.

Анализ зависимости производительности планировщиков от параметра Range показал следующее:

- настройка параметра Range имеет наибольшее значение для двунаправленных планировщиков (RRTConnect, BiTRRT, (L)BKPIECE, BiEST, SBL);
- для всех проанализированных планировщиков оптимальные значения Range-параметра инвариантны к степени загроможденности окружения робота;
- для планировщиков на основе сетки, использующих функцию sample-near ((L)BKPIECE, SBL), оптимальное значение Range-параметра располагается так, что увеличение значения, равно как и уменьшение, приводит к существенному росту времени на планирование; для других планировщиков (RRTConnect, BiTRRT, BiEST) с равномерным распределением генерируемых сэмплов (uniform sampling) имеется некоторое граничное значение Range-параметра, так что при уменьшении Range от него время планирования растет, а при увеличении от него — не изменяется;
- для планировщиков с ленивой проверкой столкновений (LBKPIECE и SBL) увеличение Range-параметра приводит к уменьшению числа успешных попыток планирования;
- сравнение производительности планировщиков для полной и избыточной кинематики манипулятора показало, что редуцирование количества приводимых в движение сочленений (заморозка) не требует перенастройки Range-параметра.

Анализ зависимости производительности мононаправленных планировщиков от параметра Goal-Bias показал следующее:

- для манипуляционных роботов, как правило, имеющих пространство поиска (конфигурационное) небольшого размера, рекомендованное OMPL значение Goal-Bias 0,05 [2] является плохим выбором; для большинства проанализированных планировщиков оптимальным можно считать значение Goal-Bias 0,5 и выше;
- выбор высокого значения параметра Goal-Bias целесообразен для манипуляторов, где существует высокая вероятность наличия свободного от столкновений пути (в конфигурационном пространстве), соединяющего начальное и целевое положения робота.

Данная работа создает задел для будущих исследований, направленных на интеграцию автоматического метода настройки планировщиков, в котором параметры подбираются онлайн в процессе планирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meijer J., Lei Q., Wisse M. Performance study of single-query motion planning for grasp execution using various manipulators // 18th Intern. Conf. on Advanced Robotics (ICAR). 2017. P. 450—457.
2. Sucan I. A., Moll M., Kavraki L. E. The open motion planning library // IEEE Robot. Autom. Mag., 2012. Vol. 19, N 4. P. 72—82.

3. *Sucan I. A., Chitta S.* MoveIt!. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2012. March, N 1(19). P. 18—19. DOI: 10.1109/MRA.2011.2181749.
4. *LaValle S. M.* Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
5. *Kuffner J. J., LaValle S. M.* RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning // *Proc. ICRA, Millennium Conf. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. 2000. Vol. 2. P. 995—1001.
6. *Karaman S., Frazzoli E.* Sampling-based algorithms for optimal motion planning // *Intern. Journal Robotics Research*. 2011. Vol. 30, N 7. P. 846—894.
7. *Salzman O., Halperin D.* Asymptotically near-optimal RRT for fast, high-quality motion planning // *IEEE Trans. Robot.* 2016. P. 473—483.
8. *Jaillet L., Cortés J., Siméon T.* Sampling-based path planning on configuration-space costmaps // *IEEE Trans. Robot.* 2010. Vol. 26, N 4. P. 635—646.
9. *Devaurs D., Siméon T., Cortés J.* Enhancing the transition-based RRT to deal with complex cost spaces // *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. 2013. P. 4120—4125.
10. *Şucan I. A., Kavraki L. E.* Kinodynamic motion planning by interior-exterior cell exploration // *Algorithmic Foundation of Robotics VIII*. Springer, 2009. P. 449—464.
11. *Hsu D., Latombe J.-C., Motwani R.* Path planning in expansive configuration spaces // *Proc. of Intern. Conf. on Robotics and Automation*. 1997. Vol. 3. P. 2719—2726.
12. *Sánchez G., Latombe J.-C.* A single-query bi-directional probabilistic roadmap planner with lazy collision checking // *Robotics Research*. Springer, 2003. P. 403—417.
13. *Janson L., Schmerling E., Clark A., Pavone M.* Fast marching tree: A fast marching sampling-based method for optimal motion planning in many dimensions // *Intern. Journal Robotics Research*. 2015. Vol. 34, N 7. P. 883—921.
14. *Ladd A. M., Kavraki L. E.* Motion Planning in the Presence of Drift, Underactuation and Discrete System Changes // *Robotics: Science and Systems*. 2005. Vol. 1. P. 233—240.
15. *Gipson B., Moll M., Kavraki L. E.* Resolution independent density estimation for motion planning in high-dimensional spaces // *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. 2013. P. 2437—2443.
16. KUKA, KUKA LBR [Электронный ресурс]: <<http://www.kuka.com/>>, 2021-04-10.
17. *Quigley M., Conley K., Gerkey B., Faust J., Foote T., Leibs J., Wheeler R., Ng A. Y.* ROS: an open-source Robot Operating System // *ICRA Workshop on Open-Source Software*. 2009. Vol. 3, N 3.2. P. 5.

Сведения об авторах

- | | |
|----------------------------------|---|
| Абдулраззак Жарух | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: abdelrazaq.ja@gmail.com |
| Сергей Алексеевич Колюбин | — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; вед. научный сотрудник; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru |

Поступила в редакцию 18.02.22; одобрена после рецензирования 03.03.22; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Meijer J., Lei Q., and Wisse M. 2017 *18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2017, pp. 450—457.
2. Sucan I.A., Moll M., and Kavraki L.E. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2012, no. 4(19), pp. 72—82.
3. Sucan I.A. and Chitta S., Cousins S. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, March, no. 1(19), pp. 18—19, DOI:10.1109/MRA.2011.2181749.
4. LaValle S.M. *Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning*, Report No. TR 98-11, 1998.
5. Kuffner J.J. and LaValle S.M. *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Symposia Proceedings* (Cat. No. 00CH37065), 2000, vol. 2, pp. 995—1001.
6. Karaman S. and Frazzoli E. *Int. J. Rob. Res.*, 2011, no. 7(30), pp. 846—894.
7. Salzman O. and Halperin D. *IEEE Trans. Robot.*, 2016, pp. 473—483.
8. Jaillet L., Cortés J., and Siméon T. *IEEE Trans. Robot.*, 2010, no. 4(26), pp. 635—646.
9. Devaurs D., Siméon T., and Cortés J. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 4120—4125.

10. Şucan I.A. and Kavraki L.E. *Algorithmic Foundation of Robotics VIII*, Springer, 2009, pp. 449–464.
11. Hsu D., Latombe J.-C., and Motwani R. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 1997, vol. 3, pp. 2719–2726.
12. Sánchez G. and Latombe J.-C. *Robotics Research*, Springer, 2003, pp. 403–417.
13. Janson L., Schmerling E., Clark A., and Pavone M. *Int. J. Rob. Res.*, 2015, no. 7(34), pp. 883–921.
14. Ladd A.M. and Kavraki L.E. *Robotics: Science and Systems*, 2005, vol. 1, pp. 233–240.
15. Gipson B., Moll M., and Kavraki L.E. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 2437–2443.
16. KUKA, <http://www.kuka.com/>.
17. Quigley M., Conley K., Gerkey B., Faust J., Foote T., Leibs J., Wheeler R., and Ng, A.Y. *ICRA Workshop on Open-Source Software*, 2009, May, no. 2(3), pp. 5.

Data on authors

- | | | |
|----------------------------|---|---|
| Abdulrazzak Jaroukh | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: abdelrazaq.ja@gmail.com |
| Sergey A. Kolyubin | — | Dr. Sci., Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Leading Scientist; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru |

Received 18.02.22; approved after reviewing 03.03.22; accepted for publication 29.03.22.

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ****А. А. КАБАНОВ^{*1}, А. В. ЗУЕВ², В. Ф. ФИЛАРЕТОВ³, А. Н. ЖИРАБОК⁴**¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия,
**kabanovaleksey@gmail.com*²Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток, Россия³Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия⁴Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Аннотация. Рассматривается задача идентификации дефектов в динамических системах, описываемых линейными дифференциальными уравнениями. Для решения задачи используются наблюдатели, построенные на основе методов оптимального управления. Предлагаемый метод синтеза таких наблюдателей базируется на идее введения новой подсистемы, в которой роль неизвестной вектор-функции, описывающей возникающие дефекты, выполняет некоторое вспомогательное управление, формируемое таким образом, чтобы оно обеспечивало минимум функционалу невязки. В отличие от популярных подходов к решению задачи идентификации дефектов на основе наблюдателей, работающих в скользящем режиме, предлагаемый метод позволяет расширить класс систем, для которых задача идентификации может быть решена, поскольку метод построения скользящих наблюдателей накладывает определенные ограничения на рассматриваемые системы. Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность диагностических наблюдателей, синтезированных с помощью предложенного метода.

Ключевые слова: линейные системы, дефекты, идентификация, наблюдатели, оптимальные системы

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021, FEFM-2021-0014, а также Севастопольского государственного университета в рамках внутреннего гранта на привлечение ведущих исследователей, идентификатор проекта 42-01-09/169/2021-5.

Ссылка для цитирования: Кабанов А. А., Зувев А. В., Филаретов В. Ф., Жирабок А. Н. Идентификация дефектов в линейных системах на основе методов оптимального управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 335—342. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-335-342.

**IDENTIFICATION OF DEFECTS IN LINEAR SYSTEMS
BASED ON OPTIMAL CONTROL METHODS****A. A. Kabanov^{*1}, A. V. Zuev², V. F. Filaretov³, A. N. Zhirabok⁴**¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
**kabanovaleksey@gmail.com*²Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia³Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia⁴Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. The problem of identifying defects in dynamic systems described by linear differential equations is considered. Observers constructed on the basis of optimal control methods are used to solve this problem. The proposed method to synthesize such observers is based on the idea of introducing a new subsystem, in which the role of an unknown vector function describing emerging defects is played by some auxiliary control. This control is proposed to be formed in such a way as to provide a minimum of the residual functional. Unlike well-known approaches to solving the problem of defect identification based on observers operating in a sliding mode, the proposed method allows to expand the class of systems for which the identification problem can be solved, since the method of constructing sliding observers imposes certain restrictions on the systems under consideration. Results of simulation are presented to confirm the operability of the diagnostic observers synthesized using the described method.

Keywords: linear systems, defects, identification, observers, optimal systems

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-03-2021-092/5 dated 09/29/2021, FEFM-2021-0014, as well as Sevastopol State University within the framework of an internal grant to attract leading researchers, project ID 42-01-09/169/2021-5.

For citation: Kabanov A. A., Zuev A. V., Filaretov V. F., Zhirabok A. N. Identification of defects in linear systems based on optimal control methods. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 5. P. 335—342 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-335-342.

Введение. Для решения задачи идентификации дефектов в линейных системах в последнее время активно используются наблюдатели, работающие в скользящих режимах [1—5]. В указанных работах на исходную систему накладывается ряд ограничений, в частности, типичные требования состоят в том, что система должна быть минимально фазовой и должно выполняться условие согласования. Это, в свою очередь, накладывает определенные ограничения на класс систем, для которых такие наблюдатели могут быть построены. В настоящей статье предлагается метод, свободный от этого недостатка, в основе которого лежат методы оптимального управления.

Постановка задачи. Рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью вида

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dd(t), \quad x(t_0) = x_0; \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ и $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода соответственно; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times q}$ и $C \in R^{l \times n}$ — известные постоянные матрицы; $d(t) \in R^q$ — вектор-функция, описывающая дефекты: при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефекта $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; предполагается, что матрица D и функция $d(t)$ описывают дефекты, которые возможны в системе, причем заранее неизвестно, какой из них может возникнуть.

Пусть известна история измерений $y(t)$ фазовых переменных $x(t)$ системы (1) на интервале $t \in [t_0, t_f]$, на котором система управляется некоторым законом, который, не умаляя общности, можно представить в виде $u(t) = G(y, t)$.

Ставится задача разработки метода построения наблюдателей для идентификации элементов вектора $d(t)$. Задача состоит в нахождении по измерениям $y(t)$ такой аппроксимации $d_*(t, t_f)$ неизвестной функции дефекта $d(t)$, что $\lim_{t_f \rightarrow \infty} d_*(t, t_f) = d(t)$.

Вспомогательная задача оптимального управления. Для решения задачи идентификации дефектов в системе (1) рассмотрим вспомогательную задачу оптимального управления для системы

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Az + Dv(t) + Bu(t), \quad z(t_0) = x_0, \\ y_z(t) &= Cz(t),\end{aligned}\tag{2}$$

где функция $v(t)$ рассматривается как вспомогательное управление.

Здесь роль неизвестной вектор-функции $d(t)$, описывающей дефекты, выполняет вспомогательное управление $v(t)$, которое выбирается так, чтобы перевести систему (2) из произвольного состояния $z(t_0) = x_0$ в состояние $y_z(t_f) = y(t_f)$ при $t_f \rightarrow \infty$ и при этом минимизировать функционал невязки

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (e^T Q e + v^T R v) dt \rightarrow \min_v, \quad (3)$$

где $e(t) = y_z(t) - y(t) \in R^l$ — вектор невязки, $Q \in R^{n \times n}$ — положительно-полуопределенная матрица; $R \in R^{m \times m}$ — положительно-определенная матрица.

Задача идентификации дефектов состоит в том, чтобы как можно более точно восстановить по измерениям $y(t)$ состояние $z(t)$ вспомогательной системы (2), т.е. нужно построить оптимальное в смысле (3) управление $v(t)$ и порождаемую им траекторию системы (2), такие что $\|y_z(t) - y(t)\| \rightarrow 0$, $\|v(t) - d(t)\| \rightarrow 0$ при $t_f \rightarrow \infty$.

Решение вспомогательной задачи оптимального управления. По сути задача (2), (3) является задачей построения линейно-квадратичного управления для следящей системы с возмущениями. Приведем ее решение.

Для задачи (2), (3) запишем гамильтониан

$$H = \frac{1}{2} (z - x)^T C^T Q C (z - x) + \frac{1}{2} v^T R v + \lambda^T (A z + D v + B u),$$

определим оптимальное управление

$$\frac{\partial H}{\partial v} = 0 \Rightarrow R v + D^T \lambda = 0 \Rightarrow v = -R^{-1} D^T \lambda, \quad (4)$$

а также составим уравнения для сопряженной переменной и переменной состояния:

$$\dot{z}(t) = \frac{\partial H}{\partial \lambda} \Rightarrow A z + D v + B u = A z - D R^{-1} D^T \lambda + B u, \quad z(t_0) = x_0,$$

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial z} \Rightarrow \dot{\lambda}(t) = -A^T \lambda - C^T Q C z + C^T Q C x.$$

Последнее соотношение можно записать в векторно-матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(t) \\ \dot{\lambda}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -D R^{-1} D^T \\ -C^T Q C & -A^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ C^T Q \end{bmatrix} y. \quad (5)$$

Общий случай задания граничных условий. Рассмотрим общий случай ненулевых граничных условий $z(t_0) \neq 0$, $z(t_f) \neq 0$. С учетом линейности системы (5) предположим, что состояние и сопряженная переменная линейно связаны зависимостью вида

$$z(t) = M(t) \lambda(t) + g(t), \quad (6)$$

где $M(t)$ — невырожденная матрица, $g(t)$ — некоторая вектор-функция.

Отметим, что преобразование (6) называют преобразованием Риккати, оно эффективно при вычислении плохо обусловленных двухточечных краевых задач [6]. Аналогичный подход используется в [7, 8] для специфических задач терминального управления.

Подставив (6) в (5), получим

$$\begin{aligned} v(t) &= -R^{-1} D^T M(t)^{-1} (z(t) - g(t)), \\ (-\dot{M}(t) + A M(t) + M(t) A^T - D R^{-1} D^T + M(t) C^T Q C M(t)) \lambda(t) &= \\ &= \dot{g}(t) - A g(t) - B u(t) - M(t) C^T Q C g(t) + M(t) C^T Q y(t). \end{aligned}$$

Перенеся члены второго уравнения в левую часть, имеем

$$\begin{aligned} (-\dot{M}(t) + A M(t) + M(t) A^T - D R^{-1} D^T + M(t) C^T Q C M(t)) \lambda(t) - \\ - \dot{g}(t) - A g(t) - B u(t) - M(t) C^T Q C g(t) + M(t) C^T Q y(t) = 0. \end{aligned}$$

Последнее соотношения должно быть справедливо для любого значения $\lambda(t)$, что приводит к системе уравнений

$$\begin{aligned}\dot{M}(t) &= AM(t) + M(t)A^T - DR^{-1}D^T + M(t)C^T QCM(t), \\ \dot{g}(t) &= Ag(t) + Bu(t) + M(t)C^T QCg(t) - M(t)C^T Qy(t).\end{aligned}\quad (7)$$

При $t = t_0$ из (6) имеем $z(t_0) = M(t_0)\lambda(t_0) + g(t_0)$, а поскольку $\lambda(t_0)$ не известна, то для удовлетворения начальных условий нужно принять $M(t_0) = 0$, $z(t_0) = g(t_0)$. При $t = t_f$ из (6) имеем $z(t_f) = M(t_f)\lambda(t_f) + g(t_f)$, а поскольку $\lambda(t_f)$ также не известна, то для удовлетворения граничных условий также следует принять $M(t_f) = 0$, $z(t_f) = g(t_f)$.

Подставляя (7) в (4), окончательно для управления $v(t)$ имеем

$$v(t) = -R^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)), \quad (8)$$

а подставив (8) в (2), получим следующее выражение для диагностического наблюдателя:

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Az(t) - DR^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)) + Bu(t), \quad z(t_0) = x_0; \\ y_z(t) &= Cz(t),\end{aligned}\quad (9)$$

где $M(t)$ и $g(t)$ определяются как решение уравнений (7) с начальными условиями $M(t_0) = 0$, $z(t_0) = g(t_0)$.

Устойчивость наблюдателя (9) может быть обеспечена за счет введения обратной связи по сигналу $e(t) = y_z(t) - y(t)$ (этот вопрос требует отдельного рассмотрения).

Чтобы получить решение задачи (2), (3) при $t_f \rightarrow \infty$, в соотношениях (7), (8) нужно принять $t_f \rightarrow \infty$. Решение матричного уравнения (7) для $M(t)$ при условии управляемости и наблюдаемости системы (2) стремится к установившемуся значению $\bar{M}$, которое является решением алгебраического уравнения [6, 7]

$$0 = A\bar{M} + \bar{M}A^T - DR^{-1}D^T + \bar{M}C^T QCM, \quad (10)$$

а функция $g(t)$ — это решение дифференциального уравнения

$$\dot{\bar{g}} = A\bar{g} + Bu + \bar{M}C^T QC\bar{g} - \bar{M}C^T Qy, \quad \bar{g}(t_0) = z(t_0). \quad (11)$$

Диагностический наблюдатель на бесконечном интервале времени будет иметь вид (9), в котором g и M заменены на $\bar{g}$ и $\bar{M}$ соответственно.

Результаты моделирования. Выполним синтез наблюдателя для электропривода на основе двигателя постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами, который имеет датчики положения выходного вала редуктора и тока. Предполагается, что в электроприводе возможны следующие типы дефектов: d_1 — дефект, приводящий к изменению номинального момента инерции J_d привода и вращающихся частей редуктора на величину $\tilde{J}_d$; d_2 — дефект, приводящий к изменению активного сопротивления R_d цепи якоря электродвигателя (например, при его значительном нагреве) на величину $\tilde{R}_d$. Наличие этих дефектов существенно снижает качественные показатели работы электроприводов и точность выполнения конкретных технологических операций.

При наличии указанных дефектов разомкнутую цепь каждого электропривода в матричной форме можно описать дифференциальным уравнением вида (1) со следующими матрицами и векторами:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/i_p & 0 \\ 0 & 0 & k_m/J_d \\ 0 & -k_\omega/L_d & -R_d/L_d \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_y/L_d \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \alpha_n \\ \dot{\alpha} \\ I \end{bmatrix}, \quad u = U,$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где I — ток якоря; L_d — индуктивность цепи якоря; k_ω — коэффициент противо-ЭДС; k_y — коэффициент усиления усилителя мощности; k_m — коэффициент крутящего момента; α_n — угол поворота выходного вала редуктора; $\dot{\alpha}$ — скорость вращения ротора электродвигателя, i_p — передаточное отношение редуктора; U — напряжение на входе усилителя мощности; $d_1 = \left(\frac{k_m}{J_d + \tilde{J}_d} - \frac{k_m}{J_d} \right) I$; $d_2 = -\frac{\tilde{R}_d}{L_d} I$.

Диагностический наблюдатель для идентификации дефектов на бесконечном интервале времени будет иметь вид (9)—(11), где

$$R = \begin{bmatrix} 10^{-1} & 0 \\ 0 & 10^{-1} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 10^{20} & 0 \\ 0 & 10^{10} \end{bmatrix}.$$

При моделировании задавались следующие значения параметров рассматриваемого следящего электропривода: $J_d = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $k_\omega = 0,00067 \text{ В} \cdot \text{с}$, $k_y = 27,71$, $R_d = 0,65 \text{ Ом}$, $L_d = 0,00026 \text{ Гн}$, $k_m = 0,135 \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $i_p = 1$. Для обеспечения заданных показателей качества управления в прямой цепи электропривода использовался типовой ПИД-регулятор. При этом в качестве входного воздействия на электропривод подавалось желаемое значение угла поворота выходного вала редуктора: $\alpha_n^*(t) = 1(t)$.

При моделировании дефекты имитировались одновременным появлением функцией $\tilde{J}_d = 0,2 \text{ J кг} \cdot \text{м}^2$ и $\tilde{R}_d = 0,2R \text{ Ом}$ в момент времени $t=2 \text{ с}$.

Выполнив настройку параметров наблюдателя, получим результат его работы при измерениях первой и третьей переменных состояния и дефектах во втором и третьем уравнениях состояния (рис. 1) и графики ошибок идентификации дефектов во втором и третьем уравнениях состояния (рис. 2). Как видно из этих рисунков, предлагаемый подход к синтезу наблюдателей может давать приемлемый результат. Для сравнения приведены графики состояния системы и наблюдателя (рис. 3) и вектора ошибок $e(t) = x(t) - z(t)$ с координатами $e_1(t), e_2(t), e_3(t)$ (рис. 4).

Качество идентификации с использованием оптимального диагностического наблюдателя (9)—(11) зависит от выбора матриц штрафов Q и R , при выборе которых можно руководствоваться следующими рекомендациями. Недиагональные элементы в этих матрицах отражают перекрестные связи между соответствующими переменными вектора выхода и дефектов. При отсутствии информации о перекрестных связях между дефектами матрицу R рекомендуется выбирать диагональной, что также относится и к матрице Q при отсутствии перекрестных связей наблюдаемых выходов. Если восстановленный сигнал, идентифицирующий дефект, имеет большую амплитуду, то соответствующие диагональные элементы матрицы R требуется уменьшить. При больших амплитудах невязки $e(t) = x(t) - z(t)$ следует увеличить соответствующие элементы Q .

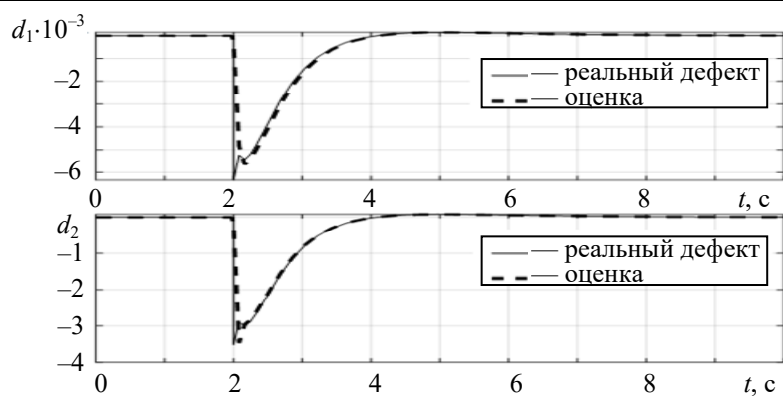


Рис. 1

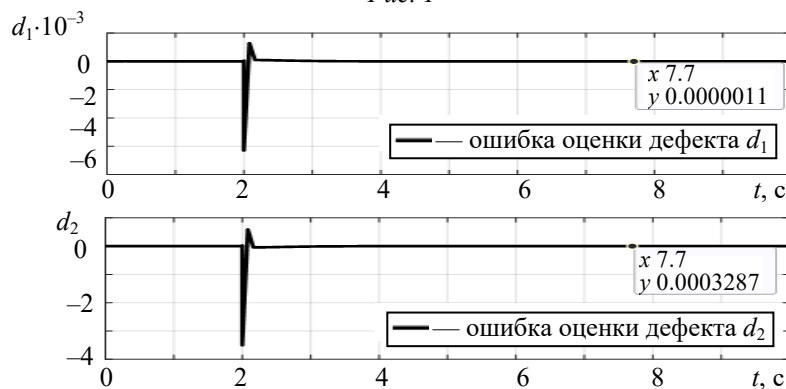


Рис. 2

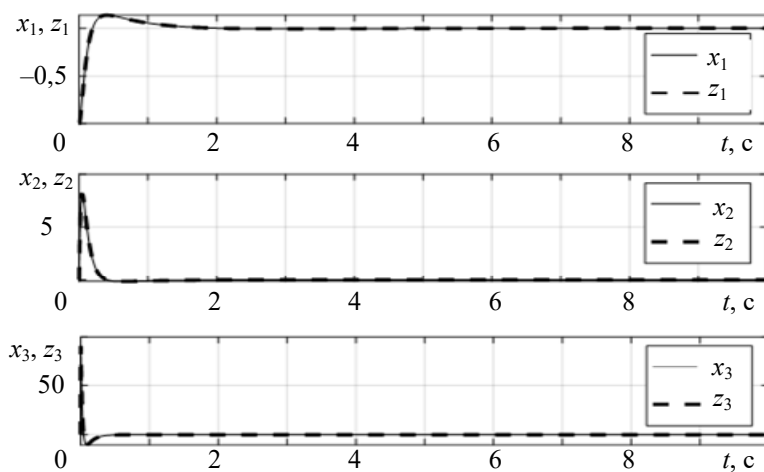


Рис. 3

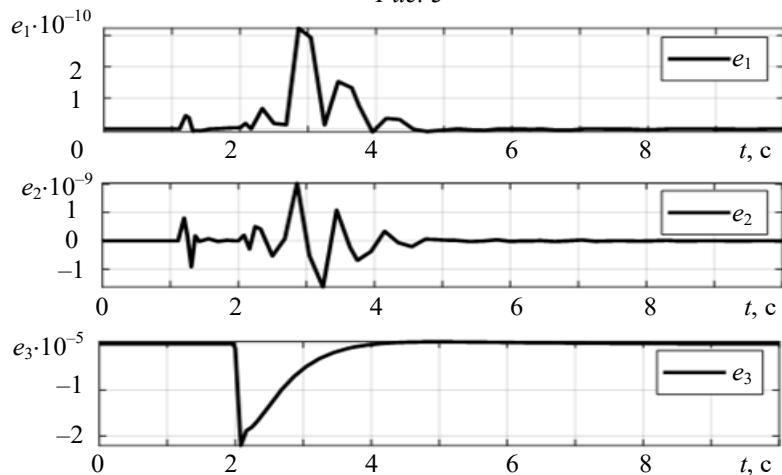


Рис. 4

Заключение. Решена задача идентификации дефектов в системах, описываемых линейными динамическими моделями. В отличие от популярных методов решения этой задачи на основе наблюдателей, работающих в скользящем режиме, предлагаемый подход позволяет расширить класс систем, для которых задача идентификации может быть решена, поскольку метод построения скользящих наблюдателей накладывает определенные ограничения на рассматриваемые системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Edwards C., Spurgeon S. On the development of discontinuous observers // Intern. J. Control. 1994. Vol. 59. P. 1211—1229.
2. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer // Intern. Journal Control. 2004. Vol. 77. P. 622—629.
3. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers // Automatica. 2007. Vol. 43. P. 1605—1614.
4. Rios H., Efimov D., Davila J., Raissi T., Fridman L., Zolghadri A. Nonminimum phase switched systems: HOSM based fault detection and fault identification via Volterra integral equation // Intern. Journal Adapt. Contr. and Signal Proc. 2014. Vol. 28. P. 1372—1397.
5. Жирабок А. Н., Зувев А. В., Филаретов В. Ф., Шумский А. Е. Идентификация дефектов на основе скользящих наблюдателей с ослабленными условиями существования // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 255—263.
6. Mufti I. H., Chow C. K., Stock F. T. Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the Riccati transformation // SIAM Rev. 1969. Vol. 11, N 4. P. 616—619.
7. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с.
8. Naidu D. S. Optimal control systems. Electrical Engineering Handbook. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003. 275 p.

Сведения об авторах

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Алексей Александрович Кабанов | — канд. техн. наук, доцент; Севастопольский государственный университет, научно-исследовательская лаборатория „Интеллектуальные системы и робототехника“; зав. лабораторией;
E-mail: kabanovaleksey@gmail.com |
| Александр Валерьевич Зуев | — канд. техн. наук, доцент; Институт проблем морских технологий ДВО РАН, лаборатория интеллектуальных систем; зав. лабораторией;
E-mail: zuev@dvo.ru |
| Владимир Федорович Филаретов | — д-р техн. наук, профессор; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория робототехнических систем; зав. лабораторией; E-mail: filaretov@inbox.ru |
| Алексей Нилович Жирабок | — д-р техн. наук, профессор; Дальневосточный федеральный университет, департамент автоматизации и робототехники; профессор;
E-mail: filaretov@inbox.ru |

Поступила в редакцию 13.01.22; одобрена после рецензирования 14.02.22; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Edwards C., Spurgeon S. *Int. J. Control*, 1994, vol. 59, pp. 1211—1229.
2. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. *Int. J. Control*, 2004, vol. 77, pp. 622—629.
3. Yan X., Edwards C. *Automatica*, 2007, vol. 43, pp. 1605—1614.
4. Rios H., Efimov D., Davila J., Raissi T., Fridman L., Zolghadri A. *Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc.*, 2014, vol. 28, pp. 1372—1397.
5. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Filaretov V.F., Shumsky A.E. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 4(64), pp. 255—263. (in Russ.)
6. Mufti I.H., Chow C.K., Stock F.T. *SIAM Rev.*, 1969, no. 4(11), pp. 616—619.
7. Bryson A.E., Jr. & Ho Y.C. *Applied optimal control: optimization, estimation, and control*, Waltham, MA: Blaisdell, 1969, 481 p.
8. Naidu D.S. *Optimal control systems*, Electrical Engineering Handbook, Florida, Boca Raton, CRC Press, 2003, 275 p.

Data on authors

- Alexey A. Kabanov** — PhD, Associate Professor; Sevastopol State University, Research Laboratory "Intelligent Systems and Robotics"; Head of the Laboratory;
E-mail: kabanovaleksey@gmail.com
- Aleksander V. Zuev** — PhD, Associate Professor; Institute of Marine Technology Problems, Far East Branch of the RAS, Laboratory of Intelligent Systems; Head of the Laboratory;
E-mail: zuev@dvo.ru
- Vladimir F. Filaretov** — Dr. Sci., Professor; Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch of the RAS, Laboratory of Robotic Systems; Head of the Laboratory;
E-mail: filaretov@inbox.ru
- Alexey N. Zhirabok** — Dr. Sci., Professor; Far Eastern Federal University, Department of Automation and Robotics; Professor; E-mail: filaretov@inbox.ru

Received 13.01.22; approved after reviewing 14.02.22; accepted for publication 29.03.22.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОФАЗНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ БОТУЛОТОКСИНА

О. В. ГРОМОВ¹, Р. Б. ГУЛИЕВ¹, Т. А. ЧЕРНЯК², Е. Е. МАЙОРОВ^{*2},
А. В. ДАГАЕВ³, И. С. ТАЮРСКАЯ⁴

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

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

³ Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал)
Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,
Ивангород, Россия

⁴ Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается возможность применения метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина. Приведены результаты сравнительного анализа данных препаратов. Представлена структурно-функциональная схема и технико-эксплуатационные характеристики разработанной рефрактометрической системы. В качестве объектов исследования использованы препараты на основе ботулотоксина — ботокс, ксеомин и диспорт. Получены экспериментальные результаты измерений концентрационных зависимостей показателя преломления в данных препаратах. Показано, что температурные зависимости в ботоксе, ксеомине и диспорте с различной концентрацией позволяют изменить алгоритм температурной коррекции рефрактометрических данных.

Ключевые слова: рефрактометрическая система, ботулотоксин, показатель преломления, эстетическая косметология, температурный коэффициент, концентрация

Ссылка для цитирования: Громов О. В., Гулиев Р. Б., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 343—349. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349.

APPLICATION OF THE TOTAL INTERNAL REFLECTION METHOD
FOR THE STUDY OF LIQUID-PHASE MEDIUM BASED ON BOTULINUM TOXIN

O. V. Gromov¹, R. B. Guliyev¹, T. A. Chernyak², E. E. Maiorov^{*2}, A. V. Dagaev³, I. S. Tayurskaya⁴

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

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

³ Ivangorod Humanitarian and Technical Institute,
Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Ivangorod, Russia

⁴ St. Petersburg University of Management Technologies and Economics,
St. Petersburg, Russia

Abstract. Application of the total internal reflection method for the study of liquid-phase media based on botulinum toxin is considered. A comparative analysis of these drugs is carried out. Structural and functional scheme, as well as technical and operational characteristics of the developed refractometric system are presented. Botulinum toxin-based drugs - Botox, Xeomin, and Dysport - are used as objects of research. Experimental results of measurements of the concentration dependences of the refractive index in these preparations are obtained. It is shown that temperature dependences for Botox, Xeomin, and Dysport at various concentrations make it possible to change the algorithm of temperature correction of refractometric data.

Keywords: refractometric system, botulinum toxin, refractive index, aesthetic cosmetology, temperature coefficient, concentration

For citation: Gromov O. V., Guliyev R. B., Chernyak T. A., Maiorov E. E., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. Application of the total internal reflection method for the study of liquid-phase medium based on botulinum toxin. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 5. P. 343—349 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349.

Введение. Препараты на основе ботулотоксина (нейротоксин) достаточно широко применяются в современной эстетической косметологии для расслабления мышц и разглаживания морщин [1, 2]. Для контроля состава жидкофазного препарата на основе ботулотоксина представляется перспективным и актуальным использование рефрактометрических технологий, основанных на методе полного внутреннего отражения. Применение рефрактометрической системы непосредственно в химических цехах на фармацевтическом производстве позволяет обеспечить оптимизацию выпускаемой продукции, а также утилизацию некачественных материалов [3, 4].

Использование рефрактометрии возможно в случае получения достоверных и точных количественных данных по оптическим свойствам препаратов на основе ботулотоксина — показателя преломления (n) и температурного коэффициента (dn/dT) [5, 6]. Рефрактометрические системы классического исполнения и общего назначения в данном случае не пригодны, так как процесс калибровки, конструкция систем и оптико-электронные блоки должны быть адаптированы к работе с жидкофазными средами на основе ботулотоксина [7, 8]. Это означает, что рефрактометрическая система может представлять интерес для измерения состава нейротоксина как в лабораторных условиях, так и на реальных производствах.

Цель настоящей статьи — исследование оптических свойств жидкофазных препаратов на основе ботулотоксина с использованием разработанной рефрактометрической системы для контроля различных водных растворов в лабораторных условиях.

Рефрактометрическая система. Исследования концентрационной зависимости показателя преломления и температурного коэффициента нейротоксинов проводились с помощью рефрактометрической системы, внешний вид которой представлен на рис. 1. Структурно-функциональная схема измерительной системы показана на рис. 2, где 1 — светодиод, 2 — оптическое волокно, 3 — двухлинзовый конденсор, 4 — призма полного внутреннего отражения, 5 — объектив, 6 — канал передачи изображения границы „свет-тень“, 7 — фотоприемник, 8 — температурный датчик, 9 — колодка сетевого питания, 10 — разъемы токовых выходов.



Рис. 1

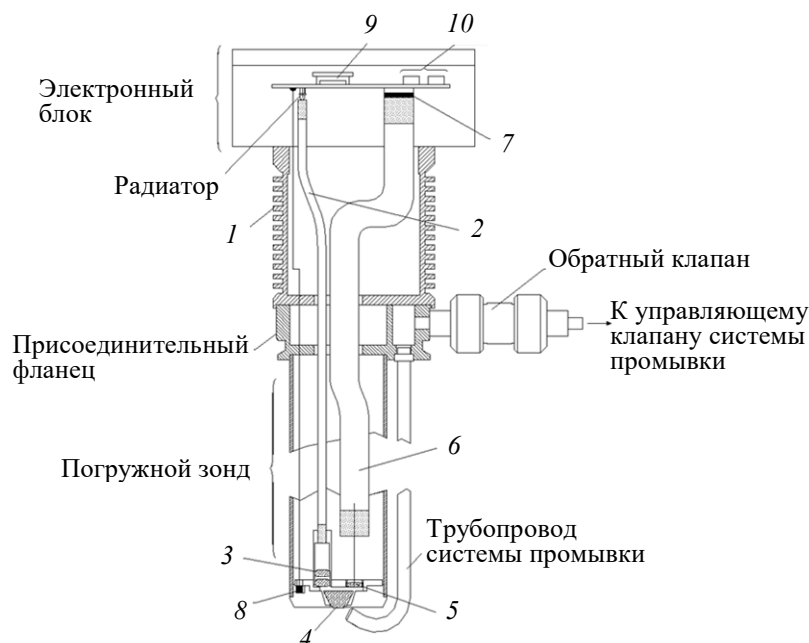


Рис. 2

В отличие от известных аналогов в разработанной рефрактометрической системе используется трапецеидальная призма из материала YAG. Система имеет увеличенную длину зондирующего элемента и оснащена дополнительным блоком очистки рабочей грани призмы. Диапазон шкал прибора по показателю преломления n и концентрации k определяется углом между вспомогательными гранями оптической призмы. При сборке изделия путем выбора одной из двух предлагаемых геометрий рабочей призмы этот диапазон может быть зафиксирован в пределах $n = 1,320 \dots 1,435$ (Brix: $^{\circ}\text{Vx} \leq 0 \dots 50 \%$) для низких концентраций раствора или $n = 1,400 \dots 1,540$ (Brix: $^{\circ}\text{Vx} \approx 40 \dots 90 \%$) для области высоких концентраций. В системе предусмотрена возможность перестройки диапазона измерений (по концентрации раствора $\Delta^{\circ}\text{Vx}$).

Технико-эксплуатационные характеристики измерительной системы

Рабочий диапазон концентраций:	
по n	1,320...1,435/1,400...1,540
по $^{\circ}\text{Vx}$, %	0...50/40...90
Рабочие пределы концентраций $\Delta^{\circ}\text{Vx}$, %	40
Погрешность измерений:	
Δn	$\pm 0,0005$
$\Delta^{\circ}\text{Vx}$, %	$\pm 0,2$
Тип температурной компенсации измерений	автоматическая
Диапазон изменения температуры	
контролируемой среды, $^{\circ}\text{C}$	0...140/0...250
Погрешность определения температуры, $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5$
Токовые выходы, мА	4—20
Масса, не более, кг	8,2 кг
Габаритные размеры, мм	450×180×180
Питание прибора:	
напряжение, В	220
частота, Гц	50

Объект исследования. Объектами исследования служили препараты на основе ботулотоксина — ботокс (США), ксеомин (Германия) и диспорт (Франция) [9, 10] (препараты были предоставлены одной из косметологических клиник Санкт-Петербурга). В работе не ставилась задача сравнительного анализа данных препаратов, исследовались исключительно оптические свойства жидкофазных сред.

Ботокс — очищенный ботулинический токсин типа А в комплексе с сывороточным человеческим альбумином (0,5 мг) и натрием хлоридом (0,9 мг). Ботокс обладает ограниченной

диффузией и позволяет получить качественный эффект в труднодоступных областях введения. Это позволяет избежать осложнений, побочных эффектов, а также сохранить естественное выражение лица. Однако содержание альбумина в такой концентрации подчеркивает сильное взаимодействие препарата с биологическим объектом, поэтому чем меньше альбумина, тем сильнее эффект.

Ксеомин — ботулинический токсин типа А в комплексе с сывороточным человеческим альбумином (1 мг) и сахарозой (4,7 мг). Низкая молекулярная масса компенсируется высоким содержанием альбумина. Поэтому по воздействию в тканях ксеомин ближе к ботоксу, он обладает мягким эффектом и средней степенью диффузии в тканях. Его используют для коррекции верхней, средней и нижней частей лица. Ориентировочно 1 ед. ксеомина равна 1 ед. ботокса.

Диспорт — ботулинический токсин типа А в комплексе с сывороточным человеческим альбумином (0,125 мг) и лактозой моногидрат. Он характеризуется более низкой молекулярной массой и высокой способностью диффузии в соседние ткани. Низкая концентрация альбумина существенно увеличивает действие препарата. Единицы активности диспорта не могут сравниваться с единицами ботокса: ориентировочно 1 ед. ботокса составляет 2,5...3 ед. диспорта. Таким образом, расчет дозы и способы введения этих препаратов различаются.

Экспериментальные результаты. Результаты измерений концентрационных зависимостей показателя преломления $n(k)$ в препаратах ботокс, ксеомин и диспорт при диапазоне температур $T = 25...35$ °C на $\lambda = 589$ нм при разной концентрации $k = 5...35$ ед. представлены полиномами третьей степени:

— для ботокса

$$n(k) = -0,0000000248k^3 + 0,0000285k^2 + 0,0008237k + 1,333; \quad (1)$$

— для ксеомина

$$n(k) = -0,00000290k^3 + 0,000000310k^2 + 0,003125k + 1,333; \quad (2)$$

— для диспорта

$$n(k) = -0,0000000318k^3 + 0,00000334k^2 + 0,001005k + 1,333. \quad (3)$$

Результаты интерполяции по формулам (1)—(3) концентрационных зависимостей $n(k)$ были не хуже $\Delta n \leq 0,0005$, что соответствует заявленной погрешности измерений показателя преломления.

Подлинность данных подтверждается сравнительным анализом результатов измерений с использованием разработанной рефрактометрической системы и данных, полученных аттестованным рефрактометрическим прибором „Эксперт про“ [11—14]. Результаты сравнительного анализа измеренных и рекомендованных показателей преломления в зависимости от концентрации жидкофазных сред на основе ботулотоксина представлены на рис. 3: *а* — ботокс, *б* — ксеомин, *в* — диспорт. Как видно из графиков, расчетные значения и независимые результаты измерений дают погрешность, не превышающую $\Delta n = 0,0008$. Полученная погрешность полностью удовлетворяет потребностям практической рефрактометрии.

Диапазон температур был ограничен в пределах $T = 25...35$ °C, как и рекомендовано для эстетической косметологии. В этом диапазоне температурные зависимости $n(T)$ были близки к линейным. График зависимости температурного коэффициента dn/dT в этом диапазоне от концентрации жидкофазных сред при $k \leq 35$ ед. представлен на рис. 4. Зависимости dn/dT для ботокса, ксеомина и диспорта совпадают с погрешностью, близкой к погрешности измерений $\Delta n = 0,0008$. Концентрационные зависимости dn/dT были существенно нелинейными. Этот результат значим при определении алгоритма температурной коррекции рефрактометрических данных.

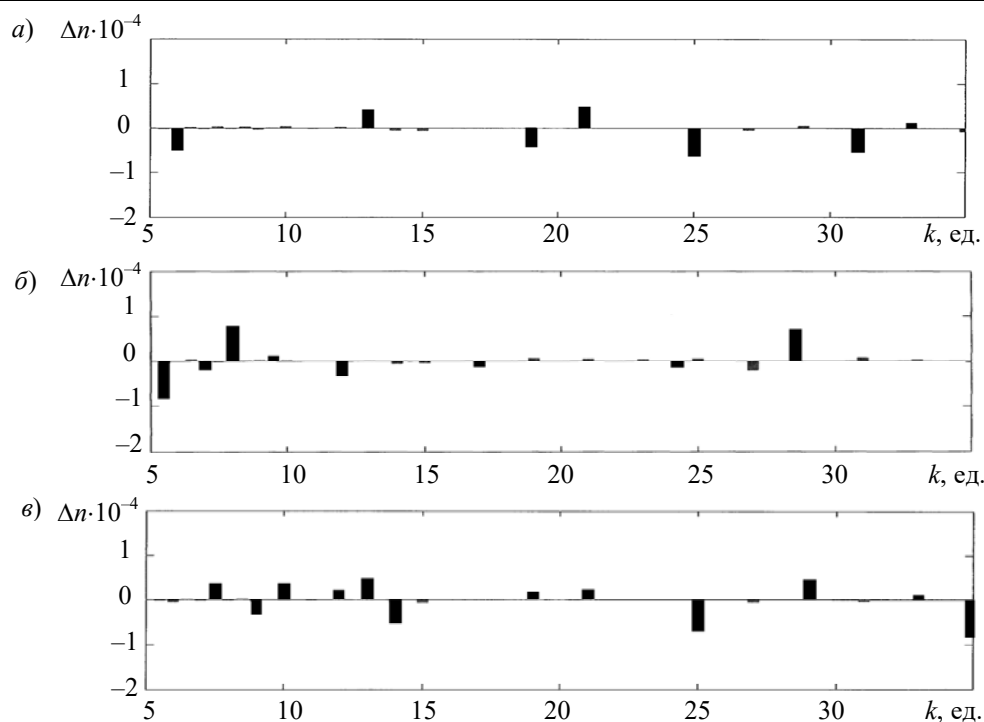


Рис. 3

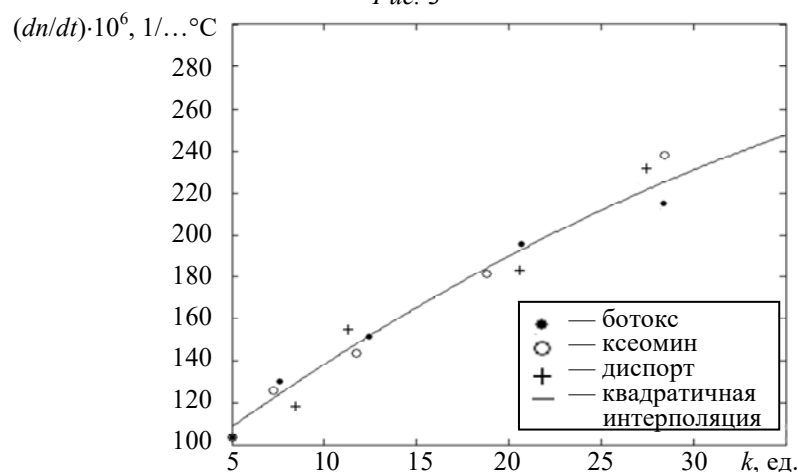


Рис. 4

В применении к температурным зависимостям $n(T)$ в ботоксе, ксеомине и диспорте с различной концентрацией k температурная компенсация по Вrix малоэффективна вследствие нелинейного характера концентрационных зависимостей dn/dT . Зависимости $dn(k)/dT$ жидкофазных сред представлены квадратичным полиномом:

$$dn/dT = -0,01011k^2 + 2,9011k + 109,11. \quad (4)$$

Для всех веществ эти зависимости практически совпадали. Результаты расчетов, выполненные на основании формулы (4), представлены на рис. 4 сплошной линией.

Заключение. Представлены результаты экспериментальных исследований оптических свойств жидкофазных препаратов на основе ботулотоксина для компенсации морщин в области глаз. Получены данные о зависимостях показателя преломления от концентрации исследуемого вещества. Важной является информация о температурной зависимости от различной концентрации веществ, так как появляется возможность изменения алгоритма температурной коррекции рефрактометрических данных. Результаты исследования представляют интерес для эстетической косметологии, а также для оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tordjman M.* Rajeunissement cutane du decollete par mesotherapie // J. Med. Esth. Chir. Dermatol. 2003. Vol. 118. P. 111—118.
2. *Бауманн Л.* Косметическая дерматология: принципы и практика. М.: МЕДпресс-информ, 2013. С. 288—325.
3. *Курлов В. В., Громов О. В., Таюрская И. С., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б.* Применение разработанного рефрактометрического датчика в пищевом производстве // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 2. С. 1—12. DOI: 10.25791/pribor.2.2021.1237.
4. *Громов О. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Удахина С. В.* Экспериментальное исследование разработанного автоматизированного рефрактометра для контроля химически агрессивных сред // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 3. С. 21—26.
5. *Майоров Е. Е., Туровская М. С., Хохлова М. В., Шаламай Л. И., Константинова А. А., Дагаев А. В., Гулиев Р. Б., Таюрская И. С.* Применение гониометрической рефракции для измерения состава щелоков в производстве сульфатной целлюлозы // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 2. С. 129—137.
6. *Guliyev R. B., Koskovich V. B., Pushkina V. P., Khokhlova M. V., Konstantinova A. A.* Optoelectronic device for measuring small length measures // The Scientific Heritage. 2019. Vol. 1, N 40. P. 35—40.
7. *Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Таюрская И. С.* Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 179—189.
8. *Майоров Е. Е., Курлов В. В., Громов О. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Таюрская И. С.* Применение рефрактометра для контроля напитков торговой марки „Lipton“ // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 170—175. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.
9. *Antoniou C., Kosmadaki M. G., Stratiges A. J., Katsambas A. D.* Photoaging: prevention and topical treatments // Amer. Journal of Clinical Dermatology. 2010. Vol. 11. P. 95—102.
10. *Fournier N. Kerscher M., Ruiz-Avila J.* The convergence of medicine and neurotoxins: a focus on botulinum toxin type A and its application in aesthetic medicine—a global, evidence-based botulinum toxin consensus education initiative. Part II. Incorporating botulinum toxin into aesthetic clinical practice // Dermatol. Surg. 2013. Vol. 39, N 3. Pt. 2. P. 510—525.
11. *Lin K. H. Chen S. P., Fuh J. L.* Efficacy, safety, and predictors of response to botulinum toxin type A in refractory chronic migraine: a retrospective study // J. Chin. Med. Assoc. 2014. Vol. 77, N 1. P. 10—15.
12. *Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В.* Использование рефрактометрии для обеспечения предполетной подготовки воздушных судов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 10. С. 1—7. DOI: 10.25791/pribor.10.2021.1294.
13. *Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В.* Оптико-электронный контроль противообледенительных жидкостей для обработки воздушных судов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 10. С. 170—175. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.
14. *Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Хохлова М. В., Удахина С. В.* Исследование противообледенительной жидкости оптоэлектронным рефрактометром // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 4. С. 88—101.

Сведения об авторах

Олег Владимирович Громов

— канд. техн. наук, доцент; Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕврАзЭС, кафедра сервиса транспортных средств; E-mail: oleggromoff@mail.ru

Рамиз Балахан оглы Гулиев

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

Татьяна Анатольевна Черняк

— канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), кафедра высшей математики и механики; E-mail: 79119113039@yandex.ru

Евгений Евгеньевич Майоров

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

- Александр Владимирович Дагаев** — канд. техн. наук; Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики, информатики и информационных таможенных технологий; E-mail: adagaev@list.ru
- Ирина Соломоновна Таюрская** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: tis_ivesep@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.22; одобрена после рецензирования 10.02.22; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Tordjman M. J. *Med. Esth. Chir. Dermatol.*, 2003, vol. 118, pp. 111–118.
2. Baumann L. *Cosmetic Dermatology: principles and practice*, Medpress-inform, 2013, pp. 288–325.
3. Kurlov V.V., Gromov O.V., Tayurskaya I.S., Maiorov E.E., Arefiev A.V., Guliyev R.B. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 2, pp. 1–12. DOI: 10.25791/pribor.2.2021.1237 (in Russ.)
4. Gromov V.O., Mayorov E.E., Tayurskaya I.S., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Udakhina S.V. *Scientific Review. Technical science*, 2021, no. 3, pp. 21–26. (in Russ.)
5. Maiorov E.E., Turovskaya M.S., Khokhlova M.V., Shalamay L.I., Konstantinova A.A., Dagaev A.V., Guliyev R.B., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 2, pp. 129–137. (in Russ.)
6. Guliyev R.B., Koskovich V.B., Pushkina V.P., Khokhlova M.V., Konstantinova A.A. *The Scientific Heritage*, 2019, no. 40(1), pp. 35–40.
7. Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Majorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 8, pp. 179–189. (in Russ.)
8. Maiorov E.E., Kurlov V.V., Gromov O.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 6, pp. 170–175, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
9. Antoniou C., Kosmadaki M.G., Stratiges A.J., Katsambas A.D. *Am. J. Clin. Dermatol.*, 2010, vol. 11, pp. 95–102.
10. Fournier N., Kerscher M., Ruiz-Avila J. *Dermatol. Surg.*, 2013, no. 3(39), pp. 510–525.
11. Lin K.H., Chen S.P., Fuh J.L. *J. Chin. Med. Assoc.*, 2014, no. 1(77), pp. 10–15.
12. Mikhalevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maiorov E.E., Arefiev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 10, pp. 1–7, DOI: 10.25791/pribor.10.2021.1294. (in Russ.)
13. Mikhalevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maiorov E.E., Kurlov V.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 10, pp. 170–175, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
14. Mikhalevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maiorov E.E., Arefiev A.V., Khokhlova M.V., Udakhina S.V. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation, 2021, no. 4(31), pp. 88–101. (in Russ.)

Data on authors

- Oleg V. Gromov** — PhD, Associate Professor; University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, Department of Vehicle Service; E-mail: oleggromoff@mail.ru
- Ramiz B. Guliyev** — PhD; University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, Department of Mathematics and Information Technologies; E-mail: ramiz63@yandex.ru
- Tatyana A. Chernyak** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail 79119113039@yandex.ru
- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: maiorov_ee@mail.ru
- Alexander V. Dagaev** — PhD; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute, Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics, Informatics, and Customs Information Technologies; E-mail: adagaev@list.ru
- Irina S. Tayurskaya** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technology and Mathematics; E-mail: tis_ivesep@mail.ru

Received 24.01.22; approved after reviewing 10.02.22; accepted for publication 29.03.22.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

УДК 658.513
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-350-356

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Д. К. АЗАРЯН, В. М. МЕДУНЕЦКИЙ*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*vm57med@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены существующие методы оценивания показателей эффективности и определены основные направления исследований в этой области. Известно, что индекс общей эффективности использования оборудования служит основой для создания семейства показателей эффективности, которые разбиты на группы и классифицированы. Проведенный анализ позволил выявить основные методики модификации базового показателя эффективности использования оборудования.

Ключевые слова: эффективность оборудования, ключевые технико-экономические показатели, производительность оборудования, технологическая линия, производственные потери

Ссылка для цитирования: Азарян Д. К., Медунецкий В. М. Показатели эффективности технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 350—356. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-350-356.

TECHNOLOGICAL EQUIPMENT EFFICIENCY INDICATORS

D. K. Azaryan, V. M. Medunetskiy*

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*vm57med@yandex.ru

Abstract. The existing methods of evaluating performance indicators are considered and the main directions of research in this area are determined. It is known that the overall efficiency index of equipment use serves as the basis for creating a family of performance indicators, which are divided into groups and classified. Presented analysis makes it possible to identify the main methods of modifying the basic indicator of overall equipment efficiency.

Keywords: equipment efficiency, key technical and economic indicators, equipment productivity, production line, production losses

For citation: Azaryan D. K., Medunetskiy V. M. Technological equipment efficiency indicators. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 5. P. 350—356 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-350-356.

Конкуренция между компаниями приводит к необходимости улучшения операционных показателей деловой деятельности. Для этого компании прибегают к использованию передовых практик управления производственными процессами, их контролирования и изменения. Определить положительный эффект изменений помогают ключевые технико-экономические показатели, важнейшим из которых является эффективность оборудования. Таким образом, особо значимыми становятся адекватные показатели для оценки и повышения эффективности оборудования. Однако даже с развитием методов определения эффективности оборудования все еще широко используются классические подходы.

В настоящей статье представлен анализ существующих методов и методик оценивания эффективности технологического оборудования и технологических линий, а также предприятий в целом.

В настоящее время общая эффективность оборудования (Overall Equipment Effectiveness — ОЕЕ) является наиболее широко известным показателем оценки эффективности технологического оборудования [1]. Несмотря на то, что данный показатель был предложен 1988 г. [2], он по-прежнему представляет интерес для научно-инженерного и экономического сообществ. Показатель ОЕЕ состоит из трех компонентов: эксплуатационная готовность (доступность) рабочей операции (ЭГ), эффективность рабочей операции (ЭФ) и коэффициент качества (КК), которые можно связать следующей формулой (ГОСТ Р ИСО 22400-2-2016):

$$\text{ОЕЕ} = \text{ЭГ} \cdot \text{ЭФ} \cdot \text{КК},$$

где ЭГ — доля времени, %, когда оборудование производило или могло производить продукцию, т.е. было в рабочем состоянии; ЭФ — теоретическая доля времени, %, которая вычисляется от действительно потраченного времени на производство при максимальной для данного оборудования скорости; КК — доля качественной продукции, %, в общей выработке линии.

Показатель ОЕЕ применяется в установившихся режимах работы главным образом массового и крупносерийного производства. Преимуществом данного показателя является комплексность, и по его использованию разработаны стандарты и соответствующие руководства. Исходя из существующей практики требуется конкретизация показателя ОЕЕ для соответствия индивидуальным потребностям различных предприятий. В связи с этим было разработано достаточно много модификаций, адаптированных к конкретным условиям производства.

Модификации показателя эффективности были разбиты на две группы для удобства анализа: показатели эффективности ручного труда и показатели эффективности оборудования (рис. 1).

Эффективность предприятия необходимо оценивать комплексно по показателям обеих групп.

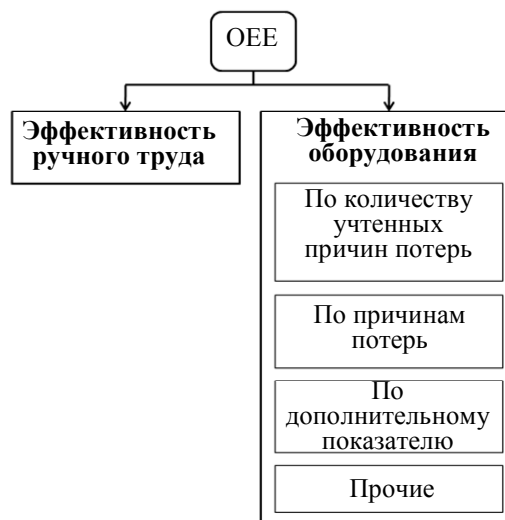


Рис. 1

В группе показателей эффективности ручного труда можно выделить три показателя, каждый из которых является усовершенствованной версией предыдущего. В 2008 г. проф. Дж. Гордоном на основе показателя ОЕЕ выведена общая эффективность труда — Overall Labour Effectiveness (OLE(1)) [3]. Согласно первоначальному определению, OLE(1), по аналогии с ОЕЕ, измеряет совокупный эффект доступности, производительности и качества продукции как для отдельных лиц, так и для группы специалистов. В 2012 г. группой ученых предложен показатель, который определяет эффективность работающих относительно

желаемого уровня производительности [4]: общую эффективность конкретного работника (Overall Worker Effectiveness — OWE) определяют как количественные, так и качественные факторы, среди которых мотивация, здоровье и отношение к работе, поэтому расчет данного показателя может оказаться затруднительным [5]. На основе анализа существующих показателей эффективности ручного труда позднее, в 2020 г., группой специалистов разработана новая структура потерь, которая позволяет оценивать показатель эффективности более „прозрачно“: например, некоторые потери, которые оценивались косвенно, в новом методе разбиваются на несколько составляющих для непосредственной оценки. Разработанный метод получил название „пересмотренная общая эффективность труда“ (Revised Overall Labour Effectiveness — ROLE) [5].

Известно, что эффективность оборудования является важным индикатором в массовом и крупносерийном производстве. Показатели эффективности оборудования внутри группы можно классифицировать по количеству учтенных причин потерь, по причинам потерь, по дополнительным показателям (надежность, потеря качества и стоимость оборудования) и прочим, которые не удалось отнести к вышеуказанным подгруппам (см. рис. 1).

Показатель эффективности оборудования ОЕЕ применим только к одной единице оборудования, в связи с этим было разработано несколько показателей, отличающиеся между собой по количеству оборудования. Таким образом, данное множество показателей также можно объединить в подгруппу.

В 2006 г. был предложен метод оценивания общей эффективности линии (Overall Line Effectiveness — OLE(2)), однако данный показатель характеризует только непрерывные линии [6]. Далее, в 2008 г., специалистами был предложен более универсальный метод оценивания общей эффективности оборудования производственной линии (Overall Equipment Effectiveness of a Manufacturing Line — OEEML) [7]. Показатель суммарной общей эффективности оборудования (Total Overall Equipment Effectiveness — TOEE) является аналогом ОЕЕ для уровня целого предприятия. Данный показатель используется для определения слабых мест в системе и скрытого потенциала производства [8]. Показатель общей заводской эффективности (Overall Factory Effectiveness — OFE) контролирует деятельность на уровне промышленного предприятия и учитывает различные машины и оборудование [9]. Промышленное предприятие может быть представлено как подсистемы, эффективность которых контролируется через показатели эффективности времени цикла (Cycle Time Effectiveness — CTE) и общую эффективность пропускной способности (Overall Throughput Effectiveness — OTE). Показатель CTE определяется отношением теоретической длительности цикла к фактической, а OTE — фактическим объемом выпускаемой продукции к теоретически возможному [10, 11]. Глобальную производственную структуру охватывает последний показатель данной подгруппы — показатель глобальной эффективности производства (Global Production Effectiveness — GPE), введенный в 2013 г. [13].

Следующая подгруппа показателей эффективности оборудования характеризует причины возможных потерь на производстве.

Показатель общей эффективности оборудования (Total Equipment Effectiveness Performance — TEER) учитывает потери при плановых остановках оборудования за счет добавления к показателю ОЕЕ дополнительного множителя загрузки. В отличие от TEER, показатель эффективности производственного оборудования (Production Equipment Efficiency — PEE) позволяет учесть большее разнообразие возможных потерь, таких как низкий спрос и транзакционные издержки. Общая эффективность завода (Overall Plant Effectiveness — OPE) и общая эффективность активов (Overall Asset Effectiveness — OAE), как и остальные рассмотренные показатели, основаны на методологии показателя ОЕЕ. Эти показатели учитывают при расчете большое количество возможных потерь, которые охватывают весь производственный процесс. Они отличаются друг от друга толкованием понятия потерь, так, ОАЕ рас-

считывает производственные потери по объему выпуска, тогда как OPE — по времени [11, 13]. Сравнительная диаграмма показателей OEE, TEER, PEE и OAE/OPE, представленная компанией MES Center [12], приведена на рис. 2.

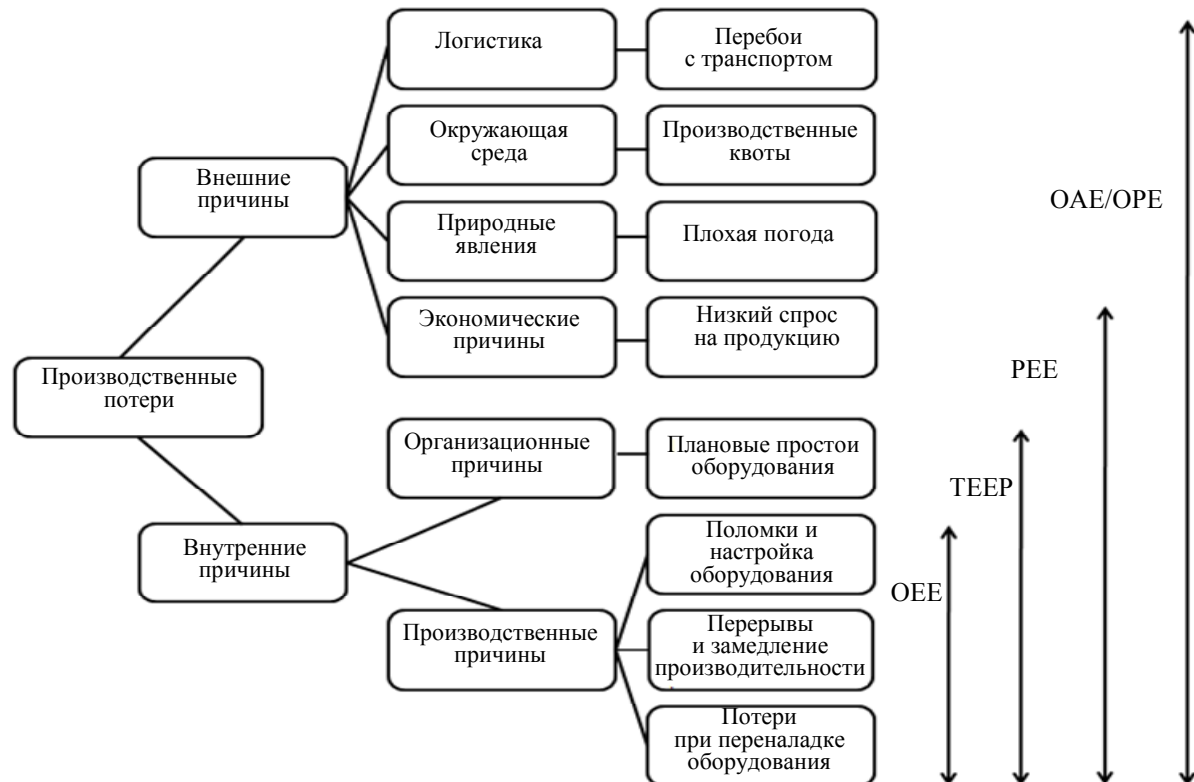


Рис. 2

В 2012 г. группа ученых модифицировала показатель эффективности OEE, разработав показатель „производительность и надежность оборудования“ (Equipment Performance and Reliability — EPR), учитывающий, помимо эффективности оборудования, его надежность [14]. Ранее другими учеными был введен показатель, определяющий общую потерю стоимости оборудования (Overall Equipment Cost Loss — OECL) и его эффективность. Введенный позднее показатель — общая потеря качества и стоимости оборудования (Overall Equipment and Quality Cost Loss — OEQCL) — позволил учесть еще и потери качества [15, 16].

Немаловажными являются показатели, которые не удалось отнести к вышеперечисленным подгруппам. Один из них — показатель чистой эффективности использования оборудования (Net Equipment Effectiveness — NEE), введенный в ГОСТ Р ИСО 22400-2-2016. Этот показатель характеризует потери, обусловленные задержками при выполнении рабочих операций, потери во время производственного цикла и при исправлении брака [1]. Также в 2006 г. на основе анализа показателя OEE был предложен показатель эффективности оборудования (Equipment Effectiveness — E), который учитывает возможные потери оборудования изолированно, т.е. потери, связанные непосредственно с машиной. Подача материала данным показателем не учитывается [2]. В 2010 г. был предложен показатель общей взвешенной эффективности оборудования (Overall Weighting Equipment Effectiveness — OWEE), учитывающий неравноценный вклад каждого элемента показателя OEE в результирующую эффективность через весовые коэффициенты [17]. Для нужд производства с большой номенклатурой и малыми объемами производимой продукции в 2015 г. группой специалистов был предложен другой показатель, который позволяет оценивать эффективность обрабатывающего оборудования (Machining Equipment Effectiveness — MEE) и учитывает возможность обработки большого количества продукции за определенный промежуток времени [18].

Следует отметить, что на многих производственных предприятиях применяют как ручной труд, так и автоматическое оборудование, например в сборочных технологических линиях. Однако, как показал анализ литературы, на сегодняшний день показатели эффективности, способные в полной мере оценить совокупность ручного труда и автоматического оборудования, практически отсутствуют. Так, например, в 2016 г. был предложен метод, с помощью которого оценивается эффективность полуавтоматической линии [19]. Идея метода заключается в том, чтобы найти среднее арифметическое между тремя составляющими. Первая составляющая — это отношение всей изготавливаемой продукции ко всей выпускаемой за вычетом негодной по причине ненадлежащей организации, а две следующие составляющие — то же отношение, за вычетом негодной продукции по причине неисправных средств производства и по причине брака. Однако данный показатель сложно поддается анализу, так как установить причины снижения эффективности невозможно, а именно, этот показатель не отражает, снизилась ли эффективность в процессе ручного труда или в процессе работы оборудования.

В итоге можно отметить, что за последнее десятилетие было разработано достаточно много методов оценивания показателей эффективности ручного труда и автоматического оборудования. Проведенный анализ позволил определить основные направления исследований в области оценки эффективности оборудования. Уточнение значимости каждого показателя с помощью весовых коэффициентов, добавление новых множителей, отражающих новые характеристики (к примеру, надежность и стоимость оборудования), замена одного или нескольких основных множителей, например, для учета потерь, не учтенных показателем ОЕЕ, — все это способы модификации базового показателя эффективности ОЕЕ. Анализ также позволил определить, что среди показателей эффективности существует недостаточно исследованная область, связанная с характеристикой полуавтоматических технологических линий, где ручной труд совмещен с работой автоматического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bititci U., Garengo P., Dorfler V., Nudurupati S. Performance measurement: Challenges for tomorrow // Intern. Journal of Management Reviews. 2012. N 14(3). P. 305—327.
2. De Ron A. J., Rooda J. E. OEE and equipment effectiveness: an evaluation // Intern. Journal of Production Research. 2006. N 44(23). P. 4987—5003. DOI: 10.1080/00207540600573402.
3. Gordon G. Overall labour effectiveness: extending the principles of OEE to the workforce. 2008. [Электронный ресурс]: <<https://www.controleng.com/articles/overall-labor-effectiveness-extending-the-principlesof-oeo-to-the-workforce/>>, 10.10.2021.
4. Saragaon B., Hiregoudar N. L., Mallur S. B. Development of a conceptual model for the measurement of Overall Worker Effectiveness (OWE) in discrete manufacturing SMES // Intern. Journal of Engineering and Innovation Technology. 2012. Vol. 2, N 3. P. 366—372.
5. Braglia M., Castellano D., Frosolini M., Gallo M., Marrazzini L. Revised overall labour effectiveness // Intern. Journal of Productivity and Performance Management. 2021. Vol. 70, N 6. P. 1317—1335. DOI: 10.1108/IJPPM-08-2019-0368.
6. Nachiappan R. M., Anantharaman N. Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system // J. of Manufacturing Technology Management. 2006. N 17(7). P. 987—1008. DOI: 10.1108/17410380610688278.
7. Braglia M., Frosolini M., Zammori F. Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML) // J. of Manufacturing Technology Management, 2008. N 20(1). P. 8—29. DOI: 10.1108/17410380910925389.
8. Piran F. A. S., De Paris A., Lacerda D. P., Camargo L. F. R., Serrano R., Cassel R. A. Overall Equipment Effectiveness: Required but not Enough—An Analysis Integrating Overall Equipment Effect and Data Envelopment Analysis // Global Journal of Flexible Systems Management. 2020. N 21(2). P. 191—206. DOI: 10.1007/s40171-020-00238-6.

9. Oechsner R., Pfeffer M., Pfitzner L., Binder H., Müller E., Vonderstrass T. (). From overall equipment efficiency (OEE) to overall Fab effectiveness (OFE) // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2002. N 5(4—5). P. 333—339. DOI: 10.1016/S1369-8001(03)00011-8.
10. Huang S. H., Dismukes J. P., Shi J., Su Q., Razzak M. A., Bodhale R., Robinson D. E. Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis // *Intern. Journal of Production Research*. 2003. N 41(3). P. 513—527. DOI: 10.1080/0020754021000042391.
11. OEE and Derived Indicators TEEP, PEE, OAE, OPE, OFE, OTE and CTE // MES Center: Официальный сайт. 2021. [Электронный ресурс]: <<http://mescenter.org/en/articles/125-oe-and-derived-indicators-teep-pee-oae-ope-ofe-ote-and-cte>>, 10.10.2021.
12. Lanza G., Stoll J., Stricker N., Peters S., Lorenz C. Measuring Global Production Effectiveness // *Procedia CIRP*. 2013. N 7. P. 31—36. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.006.
13. Muchiri P., Pintelon L. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion // *Intern. Journal of Production Research*. 2008. N 46(13). P. 3517—3535. DOI: 10.1080/00207540601142645.
14. Abdul Samat H., Kamaruddin S., Abdul Aziz I. Integration of Overall Equipment Effectiveness (OEE) and reliability method for measuring machine effectiveness // *S.-Afr. Journal of Industrial Engineering*. 2012. Vol. 23, N 1.
15. Wudhikarn R., Smithikul C., Manopiniwes W. Developing Overall Equipment Cost Loss Indicator // *Proc. of the 6th CIRP-Sponsored Intern. Conf. on Digital Enterprise Technology*. 2010. P. 557—567. DOI: 10.1007/978-3-642-10430-5_43.
16. Wudhikarn R. Improving overall equipment cost loss adding cost of quality // *Intern. Journal of Production Research*. 2012. N 50(12). P. 3434—3449. DOI: 10.1080/00207543.2011.587841.
17. Wudhikarn R. Overall Weighting Equipment Effectiveness // *IEEE Intern. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2010. DOI: 10.1109/IEEM.2010.5674418.
18. Jauregui Becker J. M., Borst J., Van der Veen A. Improving the overall equipment effectiveness in high-mix-low-volume manufacturing environments // *CIRP Annals*. 2015. N 64(1). P. 419—422. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.126.
19. Fernandez Q. Performance indicator design and implementation on semi-automated production lines: Overall Equipment Effectiveness (OEE) philosophy adaptation: MSc Thesis. 2016.

Сведения об авторах

Давид Каренович Азарян

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: azaryan.d@yandex.ru

Виктор Михайлович Медунецкий

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: vm57med@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.02.22; одобрена после рецензирования 18.02.22; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Bititci U., Garengo P., Dorfler V., & Nudurupati S. *International Journal of Management Reviews*, 2012, no. 3(14), pp. 305—327.
2. De Ron A.J., & Rooda J.E. *International Journal of Production Research*, 2006, no. 44(23), pp. 4987—5003, DOI:10.1080/00207540600573402 (<https://doi.org/10.1080/00207540600573402>).
3. Gordon G. *Overall labour effectiveness: extending the principles of OEE to the workforce*, 2008, <https://www.controleng.com/articles/overall-labor-effectiveness-extending-the-principles-of-oe-to-the-workforce/>.
4. Saragaon B., Hiregoudar N.L. & Mallur S.B. *International Journal of Engineering and Innovation Technology*, 2012, no. 3(2), pp. 366—372.
5. Braglia M., Castellano D., Frosolini M., Gallo M. & Marrazzini L. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 2021, no. 6(70), pp. 1317—1335, <https://doi.org/10.1108/IJPPM-08-2019-0368>.
6. Nachiappan R.M., & Anantharaman N. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2006, no. 7(17), pp. 987—1008, DOI:10.1108/17410380610688278 (<https://doi.org/10.1108/17410380610688278>).
7. Braglia M., Frosolini M., & Zammori F. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2008, no. 1(20), pp. 8—29, DOI:10.1108/17410380910925389 (<https://doi.org/10.1108/17410380910925389>).
8. Piran F.A.S., De Paris A., Lacerda D.P., Camargo L.F.R., Serrano R., & Cassel R.A. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 2020, no. 2(21), pp. 191—206, DOI:10.1007/s40171-020-00238-6 (<https://doi.org/10.1007/s40171-020-00238-6>).
9. Oechsner R., Pfeffer M., Pfitzner L., Binder H., Müller E., & Vonderstrass T. *Materials Science in Semiconductor*

- Processing*, 2002, no. 5(4-5), pp. 333–339, DOI:10.1016/S1369-8001(03)00011-8 ([https://doi.org/10.1016/S1369-8001\(03\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1369-8001(03)00011-8)).
10. Huang S.H., Dismukes J.P., Shi J., Su Q., Razzak M.A., Bodhale R., & Robinson D.E. *International Journal of Production Research*, 2003, no. 3(41), pp. 513–527, DOI:10.1080/0020754021000042391 (<https://doi.org/10.1080/0020754021000042391>).
 11. *OEE and derived indicators TEEP, PEE, OAE, OPE, OFE, OTE and CTE*, <http://mescenter.org/en/articles/125-oe-and-derived-indicators-teep-pee-oae-ope-ofe-ote-and-cte>.
 12. Lanza G., Stoll J., Stricker N., Peters S., & Lorenz C. *Procedia CIRP*, 2013, no. 7, pp. 31–36, DOI:10.1016/j.procir.2013.05.006 (<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.006>).
 13. Muchiri P., & Pintelon L. *International Journal of Production Research*, 2008, no. 46(13), pp. 3517–3535, DOI:10.1080/00207540601142645 (<https://doi.org/10.1080/00207540601142645>).
 14. Abdul Samat H., Kamaruddin S., & Abdul Aziz I. S. *Afr. J. Ind. Eng.*, 2012, no. 1(23), n. Pretoria Jan.
 15. Wudhikarn R., Smithikul C., & Manopiniwes W. *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology*, 2010, pp. 557–567, DOI:10.1007/978-3-642-10430-5_43 (https://doi.org/10.1007/978-3-642-10430-5_43).
 16. Wudhikarn R. *International Journal of Production Research*, 2012, no. 12(50), pp. 3434–3449, DOI:10.1080/00207543.2011.587841 (<https://doi.org/10.1080/00207543.2011.587841>).
 17. Wudhikarn R. *2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2010, DOI:10.1109/IEEM.2010.5674418 (<https://doi.org/10.1109/IEEM.2010.5674418>).
 18. Jauregui Becker J.M., Borst J., & van der Veen A. *CIRP Annals*, 2015, no. 1(64), pp. 419–422, DOI:10.1016/j.cirp.2015.04.126 (<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.126>).
 19. Fernandez Q. *Performance indicator design and implementation on semi-automated production lines: Overall Equipment Effectiveness (OEE) philosophy adaptation*, Master of Science Thesis, 2016.

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|---|
| David K. Azaryan | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: azaryan.d@yandex.ru |
| Viktor M. Medunetskiy | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: vm57med@yandex.ru |

Received 08.02.22; approved after reviewing 18.02.22; accepted for publication 29.03.22.

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

УДК 004.358
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-357-371

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИМПТОМОВ ЛОКОМОЦИОННОЙ БОЛЕЗНИ

Ю. В. ГНЕВАШЕВ, К. С. ГОРШКОВ, Г. А. КОНОВАЛОВ, С. Ю. ЛОВЛИН*,
Д. А. ПОСОХОВ, М. Х. ЦВЕТКОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

**seri-l@yandex.ru*

Аннотация. Обсуждается проблема возникновения симптомов локомоторной болезни у пользователей шлемов виртуальной реальности. Предложен контроллер для управления перемещением пользователя в виртуальной реальности, реализующий технику ходьбы на месте (walking-in-place). Устройство состоит из трех датчиков, размещенных на ногах и груди пользователя. Проведен анализ показаний датчиков, на основании которого разработаны алгоритмы для распознавания шагов, подавления случайных отклонений и повышения устойчивости работы системы. Приведены результаты эксперимента с участием 44 добровольцев, демонстрирующие снижение частоты возникновения симптомов симуляторных расстройств при использовании разработанного контроллера.

Ключевые слова: распознавание движений, фильтрация сигналов, виртуальная реальность, анализ сигналов

Благодарности: работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации, грант № 074-U01.

Ссылка для цитирования: Гневашев Ю. В., Горшков К. С., Коновалов Г. А., Ловлин С. Ю., Посохов Д. А., Цветкова М. Х. Влияние способов управления в системах виртуальной реальности на возникновение симптомов локомоторной болезни // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 357—371. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-357-371.

IMPACT OF CONTROL METHODS IN VIRTUAL REALITY SYSTEMS ON THE OCCURRENCE OF LOCOMOTION DISEASE SYMPTOMS

Yu. V. Gnevashev, K. S. Gorshkov, G. A. Konovalov, S. Yu. Lovlin*,
D. A. Posokhov, M. Kh. Tsvetkova

ITMO University, St. Petersburg, Russia

**seri-l@yandex.ru*

Abstract. The problem of the occurrence of locomotion disease symptoms in users of virtual reality helmets is discussed. To control the user's movement in virtual reality, a controller implementing the walking-in-place technique is proposed. The device consists of three sensors fixed on the user's legs and chest. The analysis of sensor readings is carried out is used as a basis of developed algorithms for recognizing steps, suppressing random deviations, and increasing the system stability. Results of an experiment involving 44 volunteers are presented to demonstrate a decrease in the frequency of simulation disorder symptoms when using the developed controller.

Keywords: motion recognition, signal filtering, virtual reality, signal analysis

Acknowledgments: The work was supported by the Government of the Russian Federation, grant No. 074-U01.

For citation: Gnevashev Yu. V., Gorshkov K. S., Konovalov G. A., Lovlin S. Yu., Posokhov D. A., Tsvetkova M. Kh. Impact of control methods in virtual reality systems on the occurrence of locomotion disease symptoms. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 5. P. 357—371 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-357-371.

Введение. В последнее десятилетие наблюдается рост интереса к теме виртуальной реальности (virtual reality — VR) как среди разработчиков электронной аппаратуры, так и среди потребителей. С появлением нового поколения систем, таких как HTC Vive, Oculus Rift и Playstation VR, VR-технологии стали доступны массовому пользователю [1]. Высококачественный стереоскопический VR-шлем позволяет эффективно симулировать глубину изображения, создавая у пользователя эффект присутствия. Вместе с тем даже кратковременный сеанс погружения в виртуальную реальность может приводить к возникновению целого спектра неприятных для пользователя симптомов, характерных для локомоционной болезни: учащенное дыхание, головокружение, тошнота и т.д. В зарубежной литературе этот комплекс симптомов обозначается термином „симуляторные расстройства“ (simulator sickness) [2, 3]. Важно отметить, что возникновение симуляторных расстройств возможно не только в процессе адаптации пользователя к виртуальной реальности во время сеанса использования шлема, но и после сеанса, в процессе реадaptации к реальному миру [2]. Как показали исследования, до 80 % пользователей испытывают эти симптомы, причем в ряде случаев их длительность может достигать 12 ч [4].

Кроме того, в большинстве представленных на рынке VR-систем слабо реализовано присутствие пользователя в виртуальном мире. В таких устройствах, как Oculus Rift и Playstation VR, по умолчанию предоставляется только один способ взаимодействия с виртуальной реальностью — с помощью джойстиков. Это не только ограничивает уровень интерактивности, но и увеличивает вероятность возникновения симуляторных расстройств, что обусловлено несоответствием между проецируемым через шлем изображением и поведением пользователя в реальном мире [2].

Очевидно, что на заре развития VR-технологий негативное влияние на самочувствие пользователя можно было отчасти объяснить несовершенством технических характеристик шлемов. Однако с каждым новым поколением VR-устройств улучшается качество изображения, уменьшаются предельные значения задержек при передаче данных и т.д. Но вопреки ожиданиям, это практически не влияет на частоту возникновения симптомов локомоционной болезни [5].

На сегодняшний день не существует общепринятой концепции, позволяющей объяснить причины возникновения симптомов кинетоза во время сеанса использования VR-шлема и/или после него. Теория сенсорного конфликта [6] предполагает, что кинетоз возникает в результате рассогласования между сигналами сенсорных систем (вестибулярной, проприоцептивной и зрительной), участвующих в формировании представления об ориентации и положении тела в пространстве. У пользователя VR-шлема возникает иллюзия движения собственного тела, или векция, т.е. ощущение движения своего тела человеком, находящимся в неподвижном положении, при наблюдении за движущейся зрительной стимуляцией, занимающей значительную часть зрительного поля [7]. Векция, возникающая в ситуации доминирования зрительного сигнала над вестибулярным, может индуцировать симуляторные расстройства [4]. Однако эмпирические исследования по проверке гипотезы о векции как главной причине возникновения симптомов кинетоза имеют неравнозначные результаты [8].

В рамках теории постуральной нестабильности [9] считается, что сенсорные конфликты [6] не являются редким событием в повседневной жизни человека и поэтому не могут быть источником симптомов локомоционной болезни. Истинной причиной векции является недостаточность адекватных сенсорных сигналов, необходимых для определения правильного

положения тела в пространстве. Как показали эксперименты, нарушения в поддержании позы всегда возникают раньше, чем иллюзия движения собственного тела [4, 10]. Сначала человек пытается адаптироваться к изменяющейся среде и найти оптимальное положение тела, а затем, не обретя такового, испытывает негативные последствия [7]. В работе [4] было установлено, что человек, имеющий общую склонность к признакам кинетоза в повседневной жизни, чаще других испытывает симуляторные расстройства от опыта погружения в виртуальную реальность.

Ряд исследователей полагает, что неприятные симптомы, которые ощущают пользователи VR-шлемов, неспецифичны и являются следствием увеличения возбуждения, приводящего к изменениям частоты дыхания, что вызывает понижение уровня углекислого газа в мозговом кровообращении [11].

Таким образом, возникновение симуляторных расстройств во многом зависит от индивидуальных физиологических особенностей человека. На данном этапе развития VR-технологий невозможно полностью исключить вероятность появления симптомов кинетоза. Однако расхождение между вергенцией и аккомодацией можно частично компенсировать, если движения тела человека в реальном мире будут полностью или частично синхронизированы с его движениями в мире виртуальном [12—14]. Цель настоящей статьи — исследование влияния способа управления перемещением пользователя в виртуальной реальности на возникновение симптомов локомоторной болезни.

Выбор способа управления перемещением в виртуальной реальности. Возможны два подхода к реализации перемещения в виртуальной реальности от точки А до точки Б: дискретное и непрерывное. Примером первого является телепортация, подразумевающая мгновенный перенос пользователя. Популярность телепортации среди разработчиков коммерческих VR-приложений объясняется ее эффективностью в снижении частоты возникновения симптомов кинетоза [15]. Однако поскольку дискретная природа телепортации принципиально отличается от естественного для человека способа перемещения, то формирование у пользователя чувства присутствия, являющегося основным достоинством VR-систем, становится труднодостижимым [16].

Непрерывное перемещение обеспечивает гораздо большую иммерсивность погружения. В то же время исследования показали существование отрицательной зависимости между симуляторными расстройствами и чувством присутствия [17]. Базовая технология обеспечения непрерывности движения предусматривает использование стандартных интерфейсов ввода данных (джойстик, клавиатура/мышь). Она является наименее эффективной как с точки зрения обеспечения комфорта, так и с точки зрения достижения чувства присутствия [18]. Применение автонавигации частично решает эти проблемы [16]. В этом случае пользователь просто перемещается автоматически в ту сторону, куда направлен его взгляд. Однако, во-первых, такой способ передвижения столь же неестественен для человека, как и телепортация, поскольку в нем никак не задействован вестибулярный аппарат, а во-вторых, он пригоден только для ограниченного числа VR-приложений.

Многочисленные исследования показали, что способы перемещения, имитирующие реальную ходьбу, позволяют существенно снизить частоту возникновения симптомов кинетоза [19]. Лучший результат достигается, когда размеры виртуального пространства соответствуют размерам пространства, окружающего пользователя в реальности [20]. В этом случае сигналы вестибулярной сенсорной системы совпадают в мозгу пользователя с визуально воспринимаемой картинкой. Однако такой подход непрактичен и может быть использован только для военных и исследовательских целей. Как правило, пространство для отслеживания перемещений пользователя бывает строго ограниченным. Оптимальным вариантом в таком случае является замена полноценной ходьбы на ее адекватную симуляцию — ходьбу на месте (walking-in-place — WIP).

Технологии реализации WIP. Первый опыт по использованию WIP-техники в виртуальной реальности был проведен более двадцати лет назад [21]. В ходе опыта использовался электромагнитный датчик, размещенный на VR-шлеме. Полученные данные обрабатывались с помощью нейросети для распознавания паттернов движения, в частности поворотов или наклонов головы пользователя, наиболее характерных для ходьбы. Эффективность распознавания оставалась довольно низкой — пользователю нужно было совершить четыре шага на месте, прежде чем он начинал двигаться в виртуальной реальности.

В дальнейшем были предложены многочисленные варианты реализации ходьбы на месте, которые можно разделить на две группы: программные и аппаратные. Первые из них не требуют использования дополнительного оборудования помимо датчиков, которыми уже оснащен VR-шлем [22—24]. Предложенные алгоритмы распознают движение по данным, регистрируемым акселерометром [22] или гироскопом [23, 24]. Эти методы довольно просты в реализации, но имеют серьезные недостатки, такие как низкая чувствительность и ограничения, накладываемые на угол и скорость поворота головы. Очевидно, что подобные техники не пригодны для множества VR-приложений, предполагающих большую активность, чем просто прогулка по VR-локациям.

Вторая группа методов основана на использовании дополнительных устройств для отслеживания перемещения тела пользователя. Это могут быть сложные физические интерфейсы, такие как беговая дорожка [25, 26], специальная платформа, измеряющая давление ног пользователя [27], и т.д. Подобные устройства являются дорогостоящими, к тому же они занимают много места, поэтому более пригодны для лабораторных исследований. Для личного пользования подходят решения, в которых предусматривается применение датчиков, интегрированных в аксессуары для современных игровых приставок Nintendo Wii Balance Board [28] и Microsoft Kinect [29]. Однако Kinect и Balance Board не позволяют определять положение пользователя в трехмерном пространстве, что значительно снижает их эффективность для реализации WIP [29].

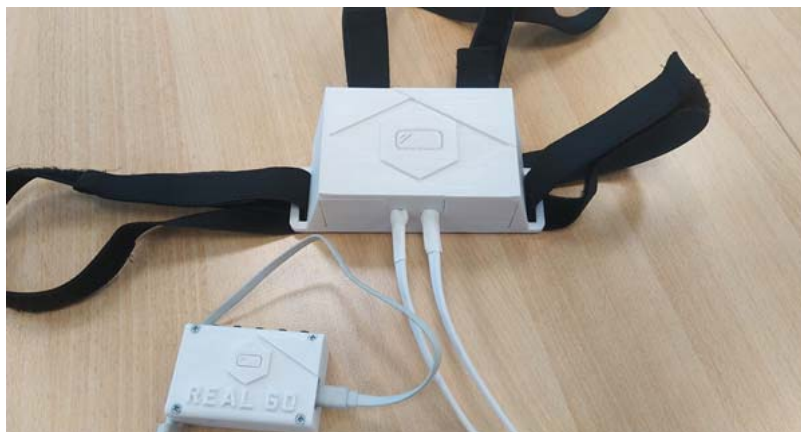
Для симуляции ходьбы на месте могут быть использованы стандартные ручные контроллеры. Человек при ходьбе, как правило, отводит руки в стороны, противоположные ходу движения, чтобы легче удерживать равновесие. Этот факт лежит в основе технологии, позволяющей отслеживать движения рук при ходьбе на месте [30]. Однако данный метод оказался непрактичным, поскольку не позволяет использовать джойстики для любых других целей и уступает по точности и удобству другим WIP-техникам [31], в которых датчики размещаются на ногах пользователя.

Известны также довольно экзотические решения. Например, в работе [32] WIP-техника реализована на основе использования видеокамеры для отслеживания движений ног по отбрасываемым ими теням.

В работе [33] показано, что при необходимости можно реализовать WIP с помощью одного сенсора, но для аккуратного отслеживания движения и снижения задержек большинство исследователей используют как минимум два датчика [15]. В другом исследовании вместо инерциальных датчиков на ноги прикреплялись светодиоды, а для отслеживания движений использовались оптические сенсоры [34]. Этот метод характеризуется сложностью настройки системы и низкой точностью работы [35].

Разработка WIP-контроллера. В данном исследовании был выбран аппаратный способ реализации WIP-техники. В результате было разработано устройство для управления перемещением пользователя в виртуальной реальности под названием „Real Go“ (рис. 1: *а* — корпус контроллера, *б* — печатные платы).

а)



б)

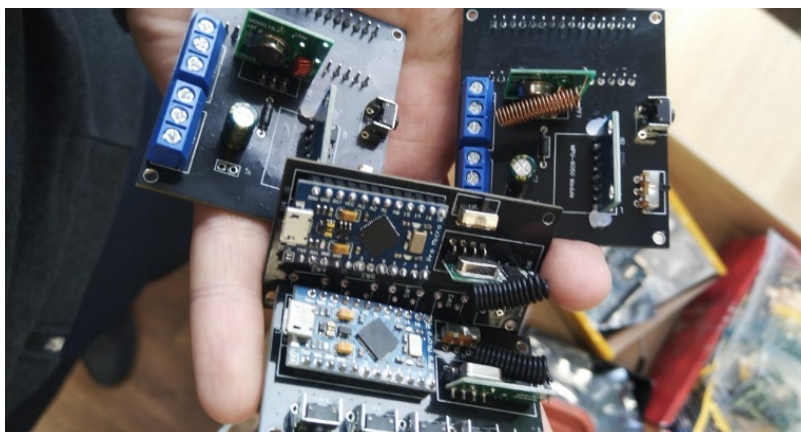


Рис. 1

Устройство контроллера „Real Go“. Контроллер реализован на платформе Arduino Nano, которая построена на микроконтроллере ATmega328. Как показали исследования, быстроедействие данного процессора достаточно для реализации WIP [13]. Используются три датчика: два расположены на ногах и один на груди пользователя. Впервые такая конфигурация была предложена в работе [21]. Однако в ней применялись сенсоры для измерения магнитного поля, предназначенные для использования в лабораторных условиях. В разработанном устройстве применяются инерциальные датчики.

В большинстве WIP-техник направление движения совпадает с направлением взгляда пользователя. Это затрудняет их использование для игровых VR-приложений. Чтобы сделать направление движения независимым от направления взгляда требуется дополнительный датчик. В работе [36] предложено разместить сенсор на поясе. Этот подход применяется также в одном из первых коммерческих WIP-устройств WalkOVR (www.walkovr.com). Дополнительные сенсоры могут быть размещены на спине и голове пользователя [37]. В контроллере „Real Go“ за выбор направления движения отвечает датчик, размещенный на груди пользователя. Выбор направления задается наклонами корпуса в одну из четырех сторон: влево, вправо, вперед или назад.

В качестве датчика отслеживания наклонов корпуса пользователя был выбран модуль MPU6050 (<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>), хорошо зарекомендовавший себя в экспериментах с WIP [13]. Он подключается по протоколу I2C и может считывать данные об ускорении по трем осям. Этот модуль содержит акселерометр, гироскоп и датчик температуры окружающей среды. MPU6050 также мог бы использоваться и для считывания данных о движениях ног.

Данный модуль может работать, используя только адреса 68 и 69, что не позволяет подключить более двух MPU6050 к плате Arduino nano. Таким образом, на ногах используются другие датчики — два аналоговых одноосных гироскопа ENC-03RC-10-R (<https://www.electrow.com/download/ENC-03.pdf>). Эти устройства легки и компактны, имеют высокую скорость отклика при низком напряжении питания и малых токах потребления. Датчики между собой соединены проводами. Связь между контроллером и персональным компьютером осуществляется с помощью передатчика Fs1000A и приемника RX480A на частоте 433 МГц.

Контроллер „Real Go“ распознается VR-шлемом как джойстик, выполняющий функцию выбора направления и уровня интенсивности движения.

Анализ показаний датчиков. Данные, полученные одноосными гироскопами ENC-03RC-10-R, представляют собой мгновенные значения ускорений движения ноги, которые необходимо обработать [38]. Движение ноги во время ходьбы и бега имеет периодический характер, т.е. скорость движения можно описать в виде периодической функции [39]

$$x(t) = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(2\omega t) + A_3 \sin(3\omega t) \dots,$$

где $x(t)$ — перемещение датчика в пространстве, A_i — амплитуда n -й гармоники скорости.

Увеличение амплитуды перемещения ноги пользователя (в итоге увеличение высоты подъема бедра) приводит к увеличению длины шага, а увеличение частоты к увеличению темпа движения. Другими словами, и то, и другое приводит к увеличению скорости движения.

Вычислим производную от координаты датчика, размещенного на бедре пользователя, и получим скорость

$$\Omega(t) = A_1 \omega \cos(\omega t) + 2A_2 \omega \cos(2\omega t) + 3A_3 \omega \cos(3\omega t) \dots$$

Иными словами, в амплитуде гармоник скорости содержится информация и об амплитуде, и о частоте шагов. Это значит, что получаемых датчиками данных вполне достаточно, чтобы оценить наличие и интенсивность движения.

На рис. 2 изображен спектральный состав сигнала, регистрируемого датчиком ENC-03RC-10-R при разной интенсивности движения. В данном эксперименте использовался только один датчик, размещенный на ноге пользователя. Желтый спектр соответствует максимальной интенсивности движения, красный — средней, а синий — минимальной. Видно, что с увеличением интенсивности движения увеличивается частота и амплитуда основных гармоник скорости.

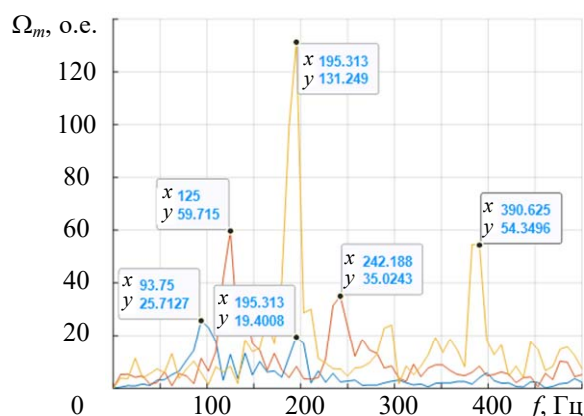


Рис. 2

На основании спектрального анализа можно сделать следующие выводы:

- сигнал скорости при ходьбе и беге имеет периодический характер;
- амплитуда основных гармоник скорости характеризует интенсивность движения.

Рассмотрим сам график скорости, построенный по показаниям датчика ENC-03RC-10-R (рис. 3, синяя линия). Хорошо видно, что в сигнале присутствует постоянная составляющая. Причем при повторных экспериментах и при размещении датчика на другой ноге значение постоянной составляющей может меняться. Поэтому для ее подавления будет эффективен фильтр верхних частот (ФВЧ). Данное решение робастно к медленным изменениям постоянной составляющей и позволяет не проводить калибровку на разных датчиках.

Ω , о.е.

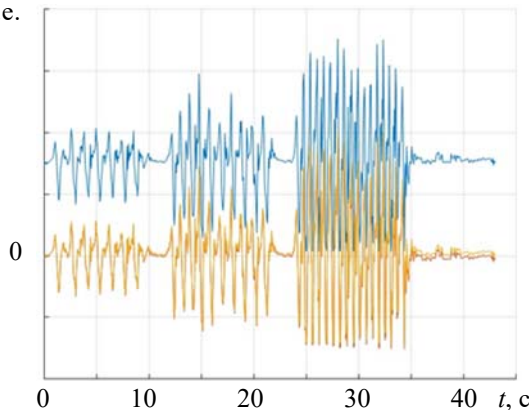


Рис. 3

В ходе исследования использовался ФВЧ первого порядка, чтобы минимизировать групповую задержку передаточной функции:

$$W(s) = \frac{Ts}{Ts + 1}, \quad (1)$$

где T — параметр фильтра, s — оператор Лапласа; параметр T определяет область низких частот, на которых сигнал будет подавляться: чем больше T , тем больше низких частот фильтр пропустит.

Учитывая, что обычно человек делает шаги примерно раз в секунду при обычном темпе движения, задаемся значением $T = 2$ с. Тогда полезные частоты пропускаются, а постоянный сигнал и низкочастотные колебания фильтруются.

Рассматриваемая система является цифровой, поэтому необходимо преобразовать передаточную функцию (1) к дискретному виду и записать разностное уравнение для обработки сигнала датчика ENC-03RC-10-R. Воспользуемся билинейным преобразованием для отображения переменной s (или аналоговой плоскости) в переменную z (т.е. в дискретную плоскость):

$$s = \frac{2}{T_d} \frac{z - 1}{z + 1},$$

где T_d — период дискретизации, равный 16 мс.

Тогда передаточная функция фильтра (1) принимает вид

$$W(z) = \frac{T_s - T_s z^{-1}}{(T_s + 1) + (T_s - 1)z^{-1}},$$

где $T_s = 2T/T_d$.

Пусть $K_1 = (T_s - 1)/(T_s + 1)$, $K_2 = T_s/(T_s + 1)$, $K_3 = -T_s/(T_s + 1)$. Тогда разностное уравнение для фильтра будет иметь следующий вид:

$$\Omega_f(n) = K_1 \Omega_f(n-1) + K_2 \Omega(n) + K_3 \Omega(n-1), \quad (2)$$

где Ω_f — отфильтрованное значение сигнала гироскопа, n — номер такта дискретизации.

Результаты работы фильтра с параметрами $K_1 = 0,992$, $K_2 = 0,996$, $K_3 = -0,996$ приведены на рис. 3, красный график; желтый график отражает результат вычитания из исходных данных показаний датчика в начальный момент времени. Как видно из рисунка, красный и желтый графики практически совпадают, но у желтого графика в конце есть постоянное смещение. Поэтому сигнал необходимо фильтровать, а не вычитать постоянное значение (калибровать).

Датчики на ногах можно разместить на бедре, колене, лодыжке [13] или ступне [16]. Для проведения измерений сенсоры были размещены на бедрах и на лодыжках пользователя. Результаты, представленные на рис. 4, показали, что амплитуда сигнала в первом случае (синяя линия) была больше, чем во втором (красная линия).

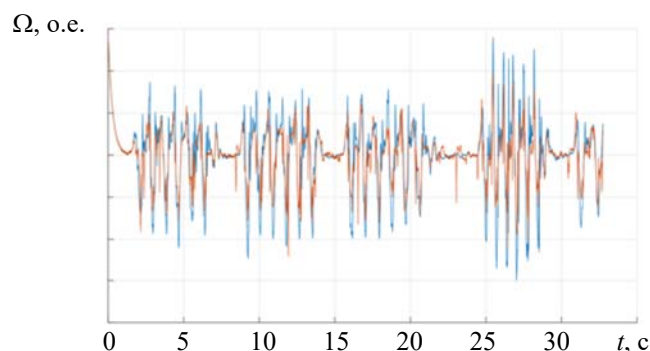


Рис. 4

Способы распознавания шагов. В работе [35] представлен сравнительный анализ двух вариантов распознавания шага в WIP-техниках. Для первого характерно попеременное сгибание пользователем колена, а при втором пользователь отрывает от земли только пятки, при этом контакт пальцев ног с поверхностью сохраняется. Как показали исследования, второй подход воспринимается пользователями как более естественный вариант ходьбы на месте [35]. В этом случае проприоцептивная обратная связь лучше соответствует той, которая возникает во время реальной ходьбы с точки зрения физических усилий, необходимых для выполнения каждого шага. В контроллере „Real Go“ реализован второй подход.

Технически распознавание шага выполняется в двух случаях:

- 1) если три заданных временных интервала подряд скорость превышает пороговое значение;
- 2) если движение фиксировалось на одном из предыдущих интервалов времени и на текущем интервале скорость превышает пороговое значение.

Во втором случае пороговое значение может быть ниже, чем в первом; в остальных случаях фиксируется отсутствие движения и скорость равна нулю.

Функция, которая описывает процедуру распознавания шага, имеет следующий вид:

$$F_{\text{step}}(n) = \begin{cases} \max(|\Omega_f(n)|, F_{\text{step}}(n-1)), & \text{если } (F_1(n) = 1) \vee (F_2(n) = 1), \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где

$$F_1(n) = (\Omega_f(n) > \Omega_{\text{thres.1}}) \wedge (\Omega_f(n-1) > \Omega_{\text{thres.1}}) \wedge (\Omega_f(n-2) > \Omega_{\text{thres.1}});$$

$$F_2(n) = (\Omega_f(n) > \Omega_{\text{thres.2}}) \wedge (F_{\text{step}}(n) \neq 0),$$

$\Omega_{\text{thres.1,2}}$ — пороговое значение скорости.

На рис. 5 продемонстрирована работа алгоритма распознавания движения: синим цветом выделен график данных о скорости, полученных сенсорами и пропущенных через фильтр высоких частот для устранения постоянной составляющей сигнала; красным цветом показан результат работы алгоритма. Видно, что лишние колебания, которые не связаны с движением, были отфильтрованы.

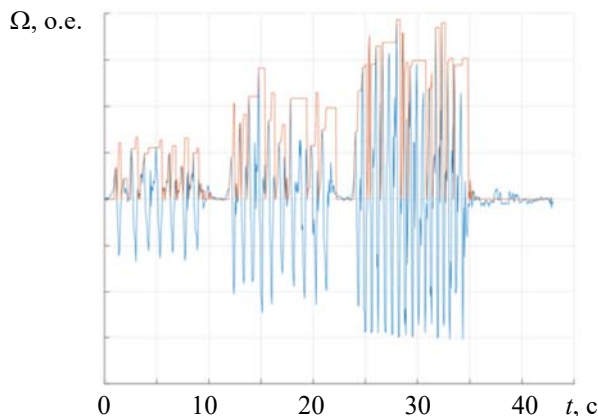


Рис. 5

Интенсивность движения характеризуется амплитудой колебаний скорости, поэтому необходимо выделить максимальные значения сигнала. Максимальное значение на каждом интервале движения определяется следующим образом:

- текущий максимум скорости равен максимальному значению из предыдущего максимума и текущему значению модуля скорости;
- при прекращении движения максимум обнуляется.

На рис. 6 показан результат вычисления максимального значения сигнала (черный график) из двух максимумов (красный и синий графики), полученных после обработки сигналов, зарегистрированных сенсорами, установленными на обеих ногах (красный и синий графики). Сигнал непрерывен во время движения, а его значение характеризует интенсивность этого движения.

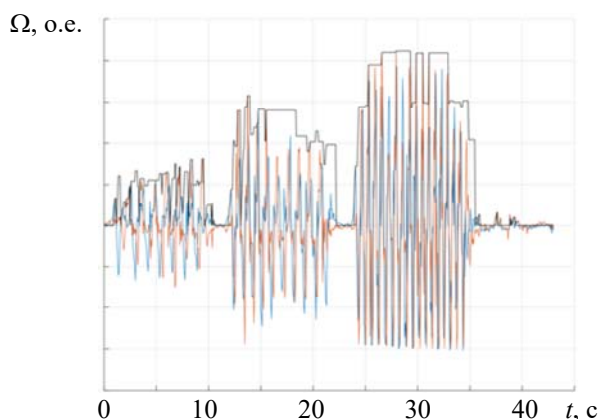


Рис. 6

Для VR-приложений может понадобиться реализация различных скоростных режимов движения, таких как медленное перемещение, ходьба, бег, полная остановка. Распознавание этих режимов предлагается осуществлять с помощью релейного управления. В алгоритме распознавания используется трехпозиционное программное реле с гистерезисом. Границы переключения определяются в результате калибровки контроллера применительно к пользователю в соответствии с его ощущениями. Гистерезис составляет 10 % от значения ускорения на

границе переключения между режимами. Результат работы алгоритма распознавания представлен на рис. 7 (черный график).

Ω , о.е.

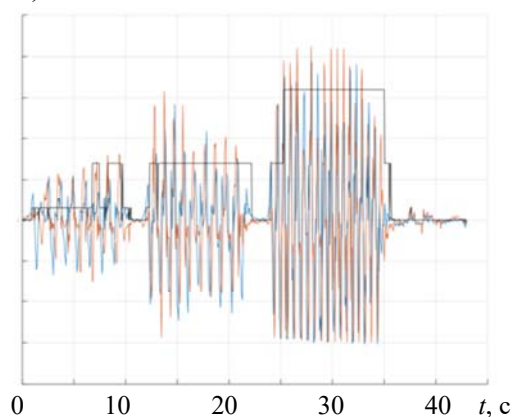


Рис. 7

Экспериментальное исследование. Эксперимент по определению влияния WIP-технологии на частоту возникновения симптомов локомоционной болезни проводился с участием 44 добровольцев (студентов и сотрудников Университета ИТМО) в возрасте от 19 до 39 лет. Никто из испытуемых не имел органических заболеваний вестибулярного аппарата и травм головного мозга.

Для проведения эксперимента использовался ноутбук Hasee A7000 (процессор Ryzen r5 3600, 16gb ОЗУ, видеокарта RTX 2070), VR-шлем Oculus Quest 2 и разработанный авторами контроллер „Real Go“. Для активной визуальной стимуляции была выбрана компьютерная игра в жанре first-person shooter „Serious Sam Fusion“, разработанная компанией Croteam и вышедшая на платформе Steam VR в 2017 г. Данная игра отличается высокой интенсивностью действия, вынуждающей игрока энергично перемещаться в виртуальном пространстве и постоянно взаимодействовать с движущимися объектами. Это приводит к возникновению у многих пользователей эффектов симуляторных расстройств [40].

Испытуемые были случайным образом разделены на две равные группы. Участники первой группы использовали разработанный контроллер „Real Go“ для перемещения и джойстики для выполнения всех остальных игровых действий (стрельба, использование предметов и т.д.). Участники второй группы, контрольной, использовали только стандартные джойстики для любых задач. В ходе эксперимента каждый испытуемый погружался на 5 минут в одно и то же игровое окружение (игровой уровень „Земля проклятых“ — https://www.youtube.com/watch?v=l_t378DK39g). Участники обеих групп во время сеанса виртуальной реальности стояли на расстоянии 2-3 м от объектов реального мира, с которыми они могли бы столкнуться. До и после эксперимента каждый испытуемый заполнял опросник „Симуляторные расстройства“ (Simulator Sickness Questionnaire — SSQ) [3], который на сегодняшний день рассматривается как наиболее достоверный для оценки симуляторных расстройств и выраженности векции [7]. Опросник включает 16 пунктов. По каждому из них участник отмечал одну из 4 степеней выраженности обозначенного ощущения — „не ощущаю“ (none), „незначительно ощущаю“ (slight), „умеренно ощущаю“ (moderate) и „ощущаю сильно“ (severe). Выделяются три симптома — тошнота, глазодвигательные реакции и потеря ориентации в пространстве, которые в основном и определяют выраженность симуляторного расстройства. Баллы по SSQ (total score — TS) рассчитываются по следующей формуле [3]:

$$TS = 3,74(9,54N + 7,58O + 13,92D), \quad (3)$$

где N — значение фактора тошноты, O — значение глазодвигательного фактора, D — значение фактора дезориентации.

Результаты. Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 8 (по оси ординат отложена частота возникновения симптомов — G). 16 участников (7 из первой группы и 9 из второй) не испытали никаких неприятных ощущений ни во время сеанса погружения в виртуальную реальность, ни после него. Все остальные сообщили о симптомах тошноты и потере ориентации в пространстве. Два человека набрали наибольшее число баллов SSQ, причем один из них использовал контроллер „Real Go“ (12,48 баллов), тогда как второй применял только джойстики (14,22 балла). Этот результат согласуется с данными о том, что у некоторых пользователей существуют индивидуальные физические особенности, которые провоцируют возникновение симуляторных расстройств [4] независимо от способа управления перемещением. В остальных случаях анализ значений общего балла, полученного при использовании опросника „Симуляторные расстройства“ и формулы (3), позволил обнаружить значимые различия между оценками уровня дискомфорта среди участников группы, в которой использовался контроллер „Real Go“ (среднее значение баллов SSQ 3,2318), и группы, в которой использовались только джойстики (среднее значение баллов SSQ 5,7481).

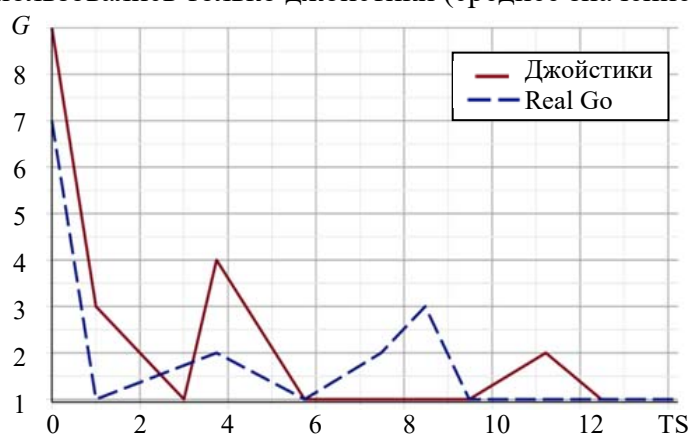


Рис. 8

Заключение. Представлены результаты исследования по влиянию способа управления перемещением пользователя в виртуальной реальности на выраженность эффектов симуляторного расстройства. Для сравнения выбраны два наиболее пригодных для практики варианта: управление стандартными джойстиками и управление с помощью WIP-технологии. Для проведения эксперимента был разработан WIP-контроллер, состоящий из трех датчиков, размещенных на ногах и груди пользователя. Предложены алгоритмы для распознавания шагов, подавления случайных отклонений и повышения устойчивости работы системы. Результат эксперимента с участием 44 добровольцев показал уменьшение частоты возникновения симптомов локомоторной болезни при использовании WIP-технологии, что согласуется с закономерностями, установленными в других исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nigel F., Liliya K. Past and future applications of 3-D (virtual reality) technology // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. N 6 (94).
2. Szpak A. et al. Beyond Feeling Sick: The Visual and Cognitive Aftereffects of Virtual Reality // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 130883—130892. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2940073.
3. Kennedy R. S. et al. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness // Intern. Journal of Aviation Psychology. 1993. Vol. 3, N 3. P. 203—220. DOI: 10.1207/s15327108ijap0303_3.
4. Risi D., Palmisano S. Effects of postural stability, active control, exposure duration and repeated exposures on HMD induced cybersickness // Displays. 2019. Vol. 60. P. 9—17. DOI: 10.1016/j.displa.2019.08.003.
5. Rebenitsch L., Owen C. Review on cybersickness in applications and visual displays // Virtual Reality. 2016. Vol. 20, N 2. P. 101—125. DOI: 10.1007/s10055-016-0285-9.

6. Reason J. T. Motion sickness adaptation: a neural mismatch model // J. of the Royal Society of Medicine. 1978. Vol. 71, N 11. P. 819—829. DOI: 10.1177/014107687807101109.
7. Меньшикова Г. Я. Психофизиологические механизмы иллюзии движения собственного тела: Автореф. дис. ... канд. психол. наук. М., 2018. 160 с.
8. Keshavarz B. et al. Vection and visually induced motion sickness: how are they related? // Frontiers in Psychology. 2015. Vol. 6. P. 472. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00472.
9. Riccio G. E., Stoffregen T. A. An ecological theory of motion sickness and postural instability // Ecological Psychology. 1991. Vol. 3, N 3. P. 195—240. DOI: 10.1207/s15326969eco0303_2.
10. Villard S. J., Flanagan M. B., Albanese G. M., Stoffregen T. A. Postural instability and motion sickness in a virtual moving room // Human Factors. 2009. Vol. 50 (2). P. 332—345. DOI: 10.1518/001872008X250728.
11. Bruck S., Watters P. A. The factor structure of cybersickness // Displays. 2011. Vol. 32, N 4. P. 153—158. DOI: 10.1518/001872008X250728.
12. Lee J., Kim M., Kim J. A study on immersion and VR sickness in walking interaction for immersive virtual reality applications // Symmetry. 2017. Vol. 9, N 5. P. 78. DOI: 10.3390/sym9050078.
13. Lee J., Jeong K., Kim J. MAVe: Maze-based immersive virtual environment for new presence and experience // Computer Animation and Virtual Worlds. 2017. Vol. 28, N 3—4. P. e1756. DOI: 10.1002/cav.1756.
14. Ng A. K. T., Chan L. K. Y., Lau H. Y. K. A study of cybersickness and sensory conflict theory using a motion-coupled virtual reality system // Displays. 2020. Vol. 61. P. 101922. DOI: 10.1016/j.displa.2019.08.004.
15. Boletsis C. The new era of virtual reality locomotion: a systematic literature review of techniques and a proposed typology // Multimodal Technologies and Interaction. 2017. Vol. 1, N 4. P. 24. DOI: 10.3390/mti1040024.
16. Boletsis C., Cedergren J. E. VR locomotion in the new era of virtual reality: an empirical comparison of prevalent techniques // Advances in Human-Computer Interaction. 2019. Vol. 2019. DOI: 10.1155/2019/7420781.
17. Weech S., Kenny S., Barnett-Cowan M. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: a review // Frontiers in Psychology. 2019. Vol. 10. P. 158. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.00158.
18. Usuh M. et al. Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments // Proc. of the 26th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1999. P. 359—364. DOI: 10.1145/311535.311589.
19. Al Zayer M., MacNeilage P., Folmer E. Virtual locomotion: a survey // IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics. 2018. DOI: 10.1109/TVCG.2018.2887379.
20. Slater M., Usuh M., Steed A. Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality // ACM Trans. on Computer-Human Interaction (TOCHI). 1995. Vol. 2, N 3. P. 201—219. DOI: 10.1145/210079.210084.
21. Feasel J., Whitton M. C., Wendt J. D. LLCM-WIP: Low-latency, continuous-motion walking-in-place // IEEE Symp. on 3D User Interfaces. IEEE, 2008. P. 97—104. DOI: 10.1109/3DUI.2008.4476598.
22. Pfeiffer T., Schmidt A., Renner P. Detecting movement patterns from inertial data of a mobile head-mounted-display for navigation via walking-in-place // IEEE Virtual Reality (VR). IEEE, 2016. P. 263—264. DOI: 10.1109/VR.2016.7504754.
23. Tregillus S., Folmer E. Vr-step: Walking-in-place using inertial sensing for hands free navigation in mobile vr environments // Proc. of the CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. 2016. P. 1250—1255. DOI: 10.1145/2858036.2858084.
24. Tregillus S., Al Zayer M., Folmer E. Handsfree omnidirectional VR navigation using head tilt // Proc. of the CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. 2017. P. 4063—4068. DOI: 10.1145/3025453.3025521.
25. Iwata H. The torus treadmill: Realizing locomotion in VEs // IEEE Computer Graphics and Applications. 1999. Vol. 19, N 6. P. 30—35. DOI: 10.1109/38.799737.
26. Darken R. P., Cockayne W. R., Carmein D. The omni-directional treadmill: a locomotion device for virtual worlds // Proc. of the 10th Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. 1997. P. 213—221. DOI: 10.1145/263407.263550.
27. Bouguila L. et al. Walking-pad: a step-in-place locomotion interface for virtual environments // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Multimodal Interfaces. 2004. P. 77—81. DOI: 10.1145/1027933.1027948.

28. Swapp D., Williams J., Steed A. The implementation of a novel walking interface within an immersive display // IEEE Symp. on 3D User Interfaces (3DUI). IEEE, 2010. P. 71—74. DOI: 10.1109/3DUI.2010.5444717.
29. Capece N., Erra U., Romaniello G. A low-cost full body tracking system in virtual reality based on Microsoft Kinect // Intern. Conf. on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics. Cham: Springer, 2018. P. 623—635. DOI: 10.1007/978-3-319-95282-6_44.
30. McCullough M. et al. Myo arm: swinging to explore a VE // Proc. of the ACM SIGGRAPH Symp. on Applied Perception. 2015. P. 107—113. DOI: 10.1145/2804408.2804416.
31. Wilson P. T. et al. VR locomotion: walking > walking in place > arm swinging // Proc. of the 15th ACM SIGGRAPH Conf. on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry. 2016. Vol. 1. P. 243—249. DOI: 10.1145/3013971.3014010.
32. Zielinski D. J., McMahan R. P., Brady R. B. Shadow walking: An unencumbered locomotion technique for systems with under-floor projection // IEEE Virtual Reality Conf. IEEE, 2011. P. 167—170. DOI: 10.1109/VR.2011.5759456.
33. Teixeira L. et al. Strategy for the Development of a Walk-In-Place Interface for Virtual Reality // Intern. Conf. of Design, User Experience, and Usability. Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. P. 419—426. DOI: 10.1007/978-3-642-39238-2_46.
34. Wendt J. D., Whitton M. C., Brooks F. P. Gud wip: Gait-understanding-driven walking-in-place // IEEE Virtual Reality Conf. (VR). IEEE, 2010. P. 51—58. DOI: 10.1109/VR.2010.5444812.
35. Nilsson N. C. et al. Tapping-in-place: Increasing the naturalness of immersive walking-in-place locomotion through novel gestural input // IEEE Symp. on 3D User Interfaces (3DUI). IEEE, 2013. P. 31—38. DOI: 10.1109/3DUI.2013.6550193.
36. Park C., Jang K., Lee J. Walking-in-place for VR navigation independent of gaze direction using a waist-worn inertial measurement unit // IEEE Intern. Symp. on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). IEEE, 2018. P. 254—257. DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00079.
37. Yan L., Allison R. S., Rushton S. K. New simple virtual walking method-walking on the spot // Proc. of the IPT Symposium. 2004.
38. Щеколдин А. И., Дема Н. Ю., Шевяков А. Д., Колюбин С. А. Отслеживание и классификация движения головы по данным нагнетного инерциального измерительного модуля // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, № 5. С. 798—804. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-798-804.
39. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. Т. 1. 318 с.
40. <https://thevrsoldier.com/serious-sam-the-first-encounter-vr-review-a-must-buy-unless-you-suffer-from-motion-sickness>.

Сведения об авторах

- | | |
|--|--|
| Юрий Витальевич Гневашев | — студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: gnev112@yandex.ru |
| Константин Сергеевич Горшков | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: k.gorshkov@list.ru |
| Георгий Александрович Коновалов | — студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: konovalov.b.2017@fml31.ru |
| Сергей Юрьевич Ловлин | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: seri-l@yandex.ru |
| Даниил Александрович Посохов | — студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: posohov_danila@mail.ru |
| Мадина Хасановна Цветкова | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: madinatcvetkova@bk.ru |

Поступила в редакцию 23.03.21; одобрена после рецензирования 15.02.22; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Nigel F., Liliya K. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 6 (94).
2. Szpak A. et al. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 130883—130892, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940073>.

3. Kennedy R. S. et al. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1993, no. 3(3), pp. 203–220, https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3.
4. Risi D., Palmisano S. *Displays*, 2019, vol. 60, pp. 9–17, <https://doi.org/10.1016/j.displa.2019.08.003>.
5. Rebenitsch L., Owen C. *Virtual Reality*, 2016, no. 2(20), pp. 101–125, <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0285-9>.
6. Reason J.T. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 1978, no. 11(71), pp. 819–829, <https://doi.org/10.1177/014107687807101109>.
7. Menshikova G.Ya. *Psikhofiziologicheskiye mekhanizmy illyuzii dvizheniya sobstvennogo tela* (Psychophysiological Mechanisms of the Illusion of Movement of One's Own Body), candidate's thesis, Moscow, 2018, 160 p. (in Russ.)
8. Keshavarz B. et al. *Frontiers in Psychology*, 2015, vol. 6, pp. 472, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00472>.
9. Riccio G.E., Stoffregen T.A. *Ecological Psychology*, 1991, no. 3(3), pp. 195–240, doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2.
10. Villard S.J., Flanagan M.B., Albanese G.M., Stoffregen T.A. *Human Factors*, 2009, no. 2(50), pp. 332–345, <https://doi.org/10.1518/001872008X250728>.
11. Bruck S., Watters P.A. *Displays*, 2011, no. 4(32), pp. 153–158, <https://doi.org/10.1518/001872008X250728>.
12. Lee J., Kim M., Kim J. *Symmetry*, 2017, no. 5(9), pp. 78, <https://doi.org/10.3390/sym9050078>.
13. Lee J., Jeong K., Kim J. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2017, no. 3-4(28), pp. e1756, <https://doi.org/10.1002/cav.1756>.
14. Ng A.K.T., Chan L.K.Y., Lau H.Y.K. *Displays*, 2020, vol. 61, pp. 101922, <https://doi.org/10.1016/j.displa.2019.08.004>.
15. Boletsis C. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2017, no. 4(1), pp. 24, <https://doi.org/10.3390/mti1040024>.
16. Boletsis C., Cedergren J.E. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2019, vol. 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/7420781>.
17. Weech S., Kenny S., Barnett-Cowan M. *Frontiers in Psychology*, 2019, vol. 10, pp. 158, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158>.
18. Usuh M. et al. *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1999, pp. 359–364, <https://doi.org/10.1145/311535.311589>.
19. Al Zayer M., MacNeilage P., Folmer E. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2887379>.
20. Slater M., Usuh M., Steed A. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 1995, no. 3(2), pp. 201–219, <https://doi.org/10.1145/210079.210084>.
21. Feasel J., Whitton M.C., Wendt J.D. *2008 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, IEEE, 2008, pp. 97–104, <https://doi.org/10.1109/3DUI.2008.4476598>.
22. Pfeiffer T., Schmidt A., Renner P. *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, IEEE, 2016, pp. 263–264, <https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504754>.
23. Tregillus S., Folmer E. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2016, pp. 1250–1255, <https://doi.org/10.1145/2858036.2858084>.
24. Tregillus S., Al Zayer M., Folmer E. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017, pp. 4063–4068, <https://doi.org/10.1145/3025453.3025521>.
25. Iwata H. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, no. 6(19), pp. 30–35, <https://doi.org/10.1109/38.799737>.
26. Darken R.P., Cockayne W.R., Carmein D. *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1997, pp. 213–221, <https://doi.org/10.1145/263407.263550>.
27. Bouguila L. et al. *Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces*, 2004, pp. 77–81, <https://doi.org/10.1145/1027933.1027948>.
28. Swapp D., Williams J., Steed A. *2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, IEEE, 2010, pp. 71–74, <https://doi.org/10.1109/3DUI.2010.5444717>.
29. Capece N., Erra U., Romaniello G. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*, Springer, Cham, 2018, pp. 623–635, https://doi.org/10.1007/978-3-319-95282-6_44.
30. McCullough M. et al. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, 2015, pp. 107–113, <https://doi.org/10.1145/2804408.2804416>.
31. Wilson P. T. et al. *Proc. of the 15th ACM SIGGRAPH Conf. on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 2016, vol. 1, pp. 243–249, <https://doi.org/10.1145/3013971.3014010>.
32. Zielinski D.J., McMahen R.P., Brady R.B. *2011 IEEE Virtual Reality Conference*, IEEE, 2011, pp. 167–170, <https://doi.org/10.1109/VR.2011.5759456>.
33. Teixeira L. et al. *International Conference of Design, User Experience, and Usability*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 419–426, https://doi.org/10.1007/978-3-642-39238-2_46.
34. Wendt J.D., Whitton M.C., Brooks F.P. *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, IEEE, 2010, pp. 51–58, <https://doi.org/10.1109/VR.2010.5444812>.
35. Nilsson N.C. et al. *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, IEEE, 2013, pp. 31–38, <https://doi.org/10.1109/3DUI.2013.6550193>.
36. Park C., Jang K., Lee J. *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, IEEE, 2018, pp. 254–257, <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00079>.
37. Yan L., Allison R.S., Rushton S.K. *Proceedings of the IPT Symposium*, 2004.
38. Shchekoldin A.I., Dema N.Yu., Shevyakov A.D., Kolyubin S.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, no. 5(17), pp. 798–804, <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-5-798-804>. (in Russ.)
39. Jenkins G.M. and Watts D.G. *Spectral analysis and its applications*, San Francisco, Holden-Day, 1968.
40. <https://thevrsoldier.com/serious-sam-the-first-encounter-vr-review-a-must-buy-unless-you-suffer-from-motion-sickness>.

Data on authors

- Yuriy V. Gnevashev** — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: gnev112@yandex.ru
- Constantin S. Gorshkov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: k.gorshkov@list.ru
- Georgy A. Konovalov** — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: konovalov.b.2017@fml31.ru
- Sergey Yu. Lovlin** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: seri-l@yandex.ru
- Daniil A. Posokhov** — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: posokhov_danila@mail.ru.ru
- Madina Kh. Tsvetkova** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: madinatcvetkova@bk.ru

Received 23.03.21; approved after reviewing 15.02.22; accepted for publication 29.03.22.

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛАСТИЧНО СВЯЗАННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТОВ**

А. В. СИЗАЯ*, И. В. ЦИВИЛЬСКИЙ

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ,
Казань, Россия*** angel.sizaya@gmail.com*

Аннотация. Объект исследования — композитные материалы, к основным преимуществам которых относятся легкость конструкции и высокая устойчивость к механическим и тепловым нагрузкам. Для прогнозирования возможных нагрузок на конструкции из композитов и учета этих данных на начальном этапе разработки деталей требуется произвести компьютерное моделирование процессов, связанных с ними. Предложен бессеточный метод оптимизации изделий из композитных материалов на основе эластично связанных метачастиц. Получены результаты оптимизационных расчетов размеров для тестовой балки под действием статической нагрузки на прогиб. Программная реализация осуществлялась на языке JavaScript без сторонних библиотек. Уменьшение массы составило 25 % от массы исходной модели. Верификация оптимизированной геометрии выполнена при аналогичных условиях механического нагружения с использованием программного пакета Ansys Student. Разработанный прототип может использоваться при определении возможного процента снижения массы конструкции из композитных материалов.

Ключевые слова: бессеточные методы, топологическая оптимизация, структурная динамика, прочность, композиционные материалы, математическое моделирование

Благодарности: исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 18-42-160015, и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках исполнения обязательств по соглашению № 075-03-2020-051/6 от 06.11.2020 (номер темы fzs-2020-0020).

Ссылка для цитирования: Сизая А. В., Цивильский И. В. Динамическая модель системы эластично связанных частиц для топологической оптимизации изделий из композитов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 372—378. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-372-378.

**DYNAMIC MODEL OF A SYSTEM
OF ELASTICALLY COUPLED PARTICLES
FOR TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF COMPOSITE MATERIAL PRODUCTS**

A. V. Sizaya*, I. V. Tsivilskiy

*A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University,
Kazan, Russia*** angel.sizaya@gmail.com*

Abstract. The object of research is composite materials, the main advantages of which include low weight of the structure and high resistance to mechanical and thermal loads. In order to predict possible loads on composite structures and take these data into account at the initial stage of parts development, computer modeling of the processes associated with them is required. A grid-less method for optimizing products made of composite materials based on elastically bonded meta-particles is proposed. The results of optimization calculations of dimensions for a test beam under the action of a static deflection load are obtained. The software implementation is carried out in JavaScript without third-party libraries. The weight reduction comprises 25% of the original model. Verification of the optimized geometry is performed under similar conditions of mechanical loading in the Ansys Student package. The developed prototype can be used to determine the possible percentage of weight reduction of a composite structure.

Keywords: meshless method, topology optimization, structural dynamics, strength, composite materials, mathematical modeling

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant 18-42-160015, and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the fulfillment of obligations under Agreement No. 075-03-2020-051/6 dated 06.11.2020 (topic number fzs-2020-0020).

For citation: Sizaya A. V., Tsivilskiy I. V. Dynamic model of a system of elastically coupled particles for topological optimization of composite material products. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 5. P. 372—378 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-372-378.

Введение. В современной промышленности проектирование и оптимизация конструкций [1, 2] — одно из приоритетных направлений развития. Промышленная инженерия направлена на создание деталей, способных выдерживать известные априори нагрузки. Например, при разработке нового типа крыла самолета специалисту требуется выбрать форму таким образом, чтобы конструкция была устойчивой, в том числе в моменты перегрузок — взлета и посадки. В дополнение к требованиям по прочности существуют ограничения на количество используемого материала. Другими словами, необходимо проектировать конструкции, которые могут выдерживать диапазон нагрузок при ограниченном количестве материала, что может быть реализовано с помощью топологической оптимизации, учитывающей структурные особенности материала, в частности композитов.

Задача проектирования может быть рассмотрена как задача оптимизации давления. Требуется разместить материал в некоторой области так, чтобы сформированная структура могла выдержать приложенную нагрузку, а масса поддерживалась на минимальном значении. Это особенно важно для деталей специального назначения (жаропрочных, хладостойких), обладающих при этом сложной геометрией.

Топологическая оптимизация позволяет:

- упростить процесс изготовления и уменьшить влияние человеческого фактора на качество конечного продукта;
- уменьшить массу изготавливаемого изделия, сохраняя физико-механические свойства практически неизменными;
- увеличить рентабельность изделия за счет уменьшения затрат на расходуемый материал.

В настоящее время большинство известных решений для моделирования композитных материалов основываются на методе конечных элементов (МКЭ) [3]. Преимущество этого подхода заключается в универсальности использования, благодаря чему метод позволяет проводить симуляции практически с любыми материалами. Суть метода заключается в построении конечно-элементной сетки [4] с последующим решением системы управляющих уравнений для каждого участка. В частности, записывается закон Гука, содержащий три основных компонента: матрицу жесткости, характеризующую структуру материала, тензор деформаций и внешнюю нагрузку.

Основными и наиболее популярными платформами для реализации топологической оптимизации методом МКЭ являются COMSOL Multiphysics и ANSYS [5]. В частности, в работе [6] они используются в рамках одного исследования.

Однако проектирование новых изделий и узлов из углеволоконных композитов — одного из самых популярных классов исследуемых материалов — сопряжено с существенными затратами вычислительных мощностей для точного решения самосогласованной задачи статки сплошной среды в материале с сильной анизотропией физических свойств. Это, во-первых, связано со сложностью задания компонентов матрицы жесткости неоднородного материала, а во-вторых, с необходимостью использования расчетных сеток высокого разрешения для моделирования сечения каждого микроволокна.

В работе [7] указывается на то, что для композитных материалов необходимы мультимасштабные симуляции и как минимум смешанный подход, включающий в себя как дискретное моделирование, так и непрерывное.

Таким образом, метод конечных элементов [8], хорошо зарекомендовавший себя для широкого круга прикладных прочностных расчетов, становится малоэффективным применительно к моделированию высокотехнологичных изделий из композитов. Это определяет актуальность исследований в данном направлении.

Цель настоящей статьи — разработка упрощенного, учитывающего структуру и особенности материала метода топологической оптимизации композитов для увеличения скорости этапа симуляций при создании и производстве новых изделий из них.

Бессеточный метод. Бессеточный метод моделирования базируется на представлении сплошного материала композита в виде системы эластично связанных метачастиц. Волокна композиционного материала заменяются на эквивалентные эластичные связи, представляющие собой тонкие стержни нулевой массы с жесткостью, пропорциональной модулю Юнга реального материала волокна.

Реализация расчета связанных дискретных метачастиц бессеточным методом условно делится на четыре этапа:

- задание начальных положений для метачастиц и задание характеристик упругих свойств материала, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона (отдельно для наполнителя и для волокна);
- расчет динамики частиц;
- расчет связей между частицами;
- расчет эквивалентных локальных напряжений по смещениям u , v , w (u — смещение вдоль оси X , v — смещение вдоль оси Y , w — смещение вдоль оси Z).

Первоначально вычисляются такие базовые параметры, как масса частицы

$$m_i = \rho V \frac{1}{N},$$

где ρ — плотность материала, V — объем элементарной ячейки, N — число частиц в ячейке, и исходное значение жесткости эластичной связи

$$k = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)},$$

где E — модуль Юнга для данного материала, ν — коэффициент Пуассона.

Эффективная жесткость определяется исходя из того, что напряжение σ связи эквивалентно давлению P в ней. Эти параметры описываются следующими уравнениями:

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{dl}{l_0}; \quad (1)$$

$$P = \frac{F_{\text{упр}}}{S_0} = \frac{kdl}{S_0}, \quad (2)$$

где ε — деформация, dl — изменение длины эластичной связи, l_0 — начальная длина связи, $F_{\text{упр}}$ — сила упругости, S_0 — площадь поперечного сечения связи.

Приравняв формулы (1) и (2), получаем соотношение

$$k = \frac{ES_0}{l_0}.$$

Решение уравнения динамики частиц (p_1, p_2) выполняется в лагранжевой постановке: для каждой из них рассчитывается приращение координат за счет действия внешних сил (ускорение, гравитация) на основе формальной ньютоновской механики. Данное выражение есть уравнение движения:

$$\ddot{r} = F/m_i.$$

После расчета изменения координат частиц под действием внешних сил координаты

попарно корректируются посредством сдвига (d) вдоль соединяющих их прямых линий — виртуальных связей — для учета эластичного взаимодействия между ними (рис. 1; l — исходная длина недеформированной связи). Попарная коррекция координат вершин эластичной связи затем выполняется для всех частиц, причем многократно (релаксационно) для достижения заданной точности решения.

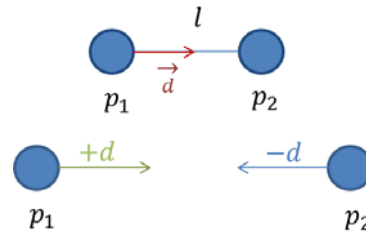


Рис. 1

Далее решаются уравнения для связей между частицами:

$$\left. \begin{aligned} u(p_2) &= u(p_2) - \mathbf{d} \frac{l}{2} k \tau; \\ u(p_1) &= u(p_1) + \mathbf{d} \frac{l}{2} k \tau, \end{aligned} \right\},$$

где $\mathbf{d}$ — единичный вектор вдоль связи.

Для оптимизации конструкций существует несколько основных приемов: оптимизация размеров, формы и топологическая оптимизация (рис. 2, а—в соответственно), подробно рассмотренные в работе [9]. Для полностью сплошных тел используется топологическая оптимизация. Если же тело имеет определенную внутреннюю форму или структуру (фиксированное количество отверстий, поры и т.д.), то применяется оптимизация формы.

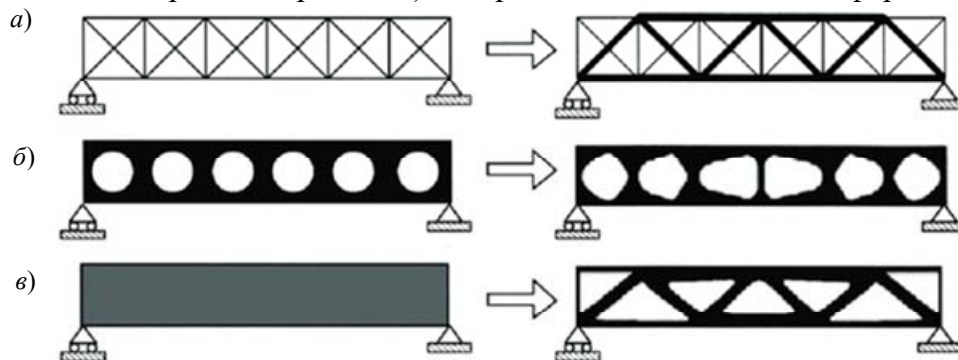


Рис. 2

Распространенный подход к реализации данных методов — введение параметра „виртуальная плотность“, принимающего значения от нуля (вне изделия) до единицы (внутри изделия) и имитирующего наличие или отсутствие материала в заданном микрообъеме. При прочностном расчете задается эффективный модуль Юнга, зависящий от виртуальной плотности ρ_v :

$$E(\mathbf{r}) = E_0 \rho_v(r)^s, \quad (3)$$

где E_0 — истинный модуль Юнга материала изделия, $\mathbf{r}$ — радиус-вектор точки пространства внутри изделия, s — фактор четкости или резкости поверхности (если $s > 1$, граница перехода ρ_v становится четче, материал удаляется из детали более агрессивно, и наоборот: фактор $s < 1$ приводит к плавному изменению ρ_v на границе „деталь—пустота“).

После расчета деформации изделия под заданной внешней нагрузкой путем решения уравнения статики сплошной среды:

$$\nabla \sigma = -\mathbf{F}, \quad (4),$$

где σ — тензор напряжений, $\mathbf{F}$ — вектор внешней нагрузки, из объема детали удаляются

(путем обнуления виртуальной плотности) области с минимальными внутренними механическими напряжениями, поскольку они вносят незначительный вклад в жесткость конструкции.

Процесс повторяется, пока не будет достигнут необходимый минимум массы изделия при сохранении ее прочностных характеристик:

$$(1/V) \cdot \int \rho_v dV \rightarrow \min, \quad (5)$$

где V — исходный объем детали.

Ключевой принцип в данном подходе — сохранение плотности, а значит, и материала изделия в областях под воздействием существенных внешних нагрузок, и удаление материала с приравниванием плотности детали в данной области к нулю при низкой интенсивности напряжений.

В данной работе исследуется третий тип — оптимизация размеров, применяемая для упрощенных дискретных структур в виде частиц со связями. Суть данного метода заключается в решении задачи одномерной линейной упругости для каждой из связей в сетке, звенья с наименьшим относительным удлинением удаляются.

Для оптимизации размеров двухмерного образца проведены расчеты на прогиб в сечении слоя под статической механической нагрузкой, направленной вниз по оси Y , с использованием бессеточного метода. Боковые стороны образца были жестко зафиксированы. Тип соединения точек в ячейках: крест-накрест. Соотношение горизонтальной и вертикальной сторон равно 1:4.

Результаты оптимизации размеров тестовой балки при уменьшении массы материала на 10, 14, 16 и 25 % представлены на рис. 3, $a—г$ соответственно; синий цвет обозначает области минимального напряжения, зеленый и красный — области высокого и максимального напряжения, черный цвет — жестко зафиксированные точки.

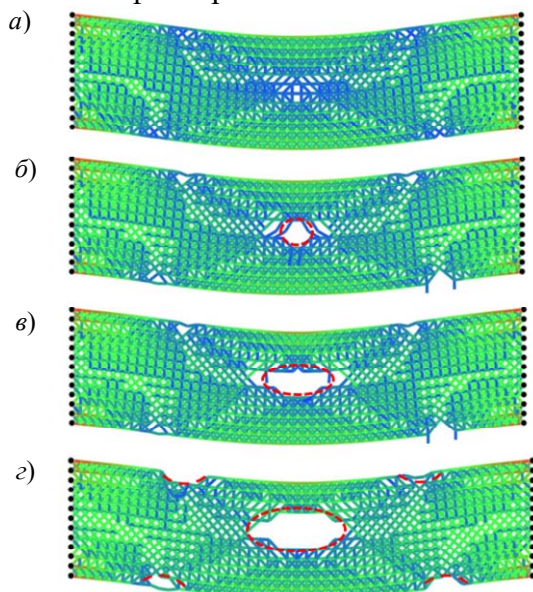


Рис. 3

Визуально можно отследить, что в областях минимального напряжения (синий цвет) материал удаляется. В областях не максимального напряжения (сине-зеленый цвет) звенья становятся более редкими, что является симуляцией установления градиента плотности в материале. Области высокого напряжения, в том числе максимального (зеленые и красные), сохраняются неизменными.

Для верификации модели выполнены аналогичные расчеты методом конечных элементов с помощью программного пакета Ansys Student с эквивалентными условиями (рис. 4, $a—в$) — прогиб под статической механической нагрузкой, направленной вниз по оси Y . Боковые стороны образца были также жестко зафиксированы. На рисунке использованы следующие обо-

значения: remove — удаленный объем с минимальными значениями напряжений; marginal — оставленные в объеме тела ячейки с максимальными механическими напряжениями под нагрузкой; keep — сохраненный объем жестко зафиксированных ячеек.

При топологической оптимизации (рис. 4, а) достигается снижение массы конструкции на 25 % от изначальной, что коррелирует с проведенной оптимизацией размеров, так же как и распределение полей смещений и напряжений (рис. 4, б, в).

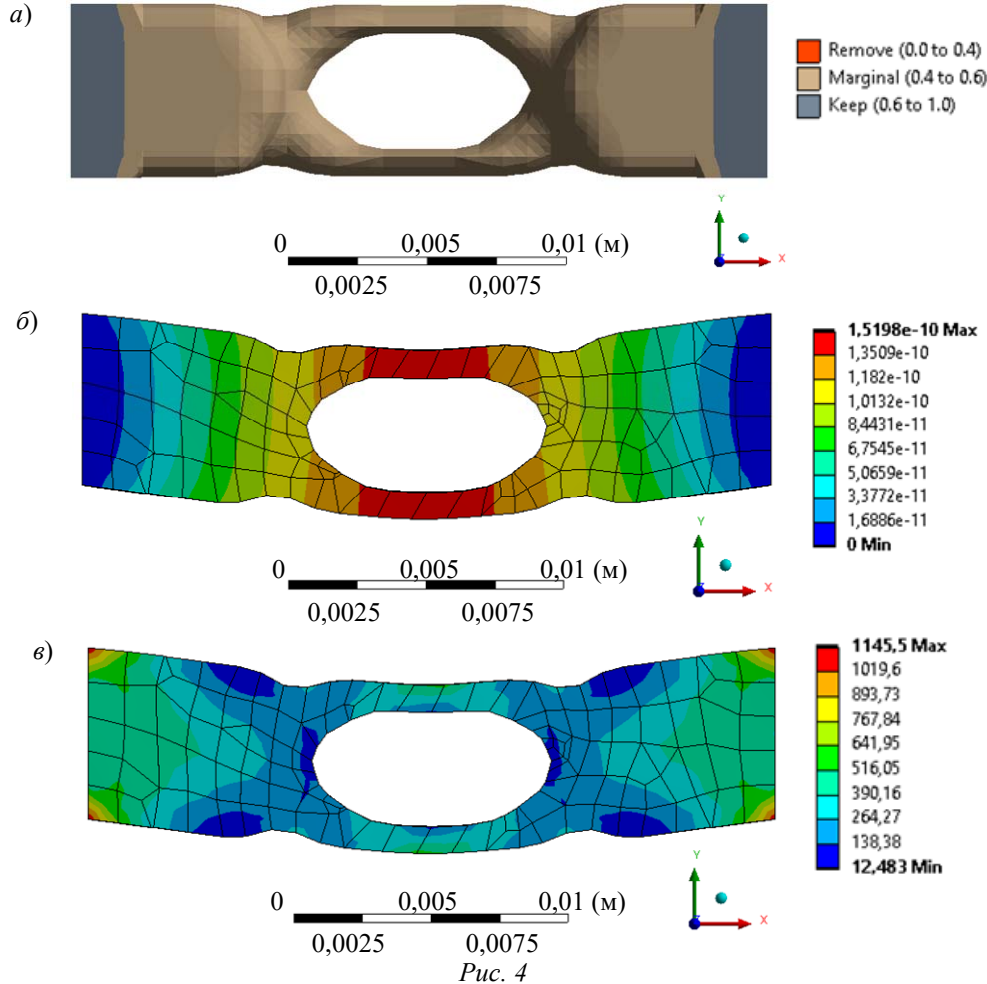


Рис. 4

Заключение. Представлены результаты оптимизации размеров для двухмерного образца методом метачастиц с эластичными связями, выполнен верификационный расчет методом конечных элементов с использованием программного обеспечения Ansys Workbench. Уменьшение массы достигло уровня 25 % от первоначальной как при использовании разработанного прототипа, так и пакета Ansys. Показано, что по ряду характеристик прототип программы не уступает коммерческим версиям программного обеспечения, а по скорости выполнения расчетов даже превосходит их.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gebisa A. W., Lemu H. G. A case study on topology optimized design for additive manufacturing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 276. 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012026.
2. Bashin K. A., Torsunov R. A., Semenov S. V. Topology optimization methods in aerospace industry // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 51—61. DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05.
3. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann, 2013. P. 683—684. DOI: 10.1016/B978-1-85617-633-0.00032-0.

4. Liu G. R., Quek S. S. *The Finite Element Method: A Practical Course*. 2014 [Электронный ресурс]: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00001-1>>.
5. ANSYS Corporation: ANSYS online help, 2010. [Электронный ресурс]: <<https://ansyshelp.ansys.com>>, 20.10.2021.
6. Xie L., Zhang Y., Ge M., Zhao Y. Topology optimization of heat sink based on variable density method // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 718—726. DOI: [org/10.1016/j.egy.2021.11.214](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.214).
7. Leclerc W., Haddad H., Guessasma M. DEM-FEM coupling method to simulate thermally induced stresses and local damage in composite materials // *Intern. Journal of Solids and Structures*. 2019. Vol. 160. P. 276—292. DOI: [org/10.1016/j.ijsolstr.2018.10.030](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.10.030).
8. Nienartowicz M., Strek T. Modeling and FEM analysis of dynamic properties of thermally optimal composite materials // *Intern. Center Numerical Methods Engineering, Barcelona, Spain*. 2014. P. 593—604.
9. Ferguson Z., Williams F. Topology Optimization with FEniCS, 2018 [Электронный ресурс]: <<https://github.com/zfergus/fenics-topopt>>, 15.05.2021.

Сведения об авторах

- Анжелика Владимировна Сизая** — студентка; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, кафедра лазерных технологий; E-mail: angel.sizaya@gmail.com
- Илья Владимирович Цивильский** — канд. техн. наук; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, кафедра лазерных технологий; доцент; E-mail: ivtsivilskiy@kai.ru

Поступила в редакцию 12.12.21; одобрена после рецензирования 17.01.22; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Gebisa A.W., Lemu H.G. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 276, 2017, DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012026.
2. Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2017, no. 51, pp. 51—61, DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.05.
3. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals (Seventh Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 683—684, ISBN 9781856176330, DOI 10.1016/B978-1-85617-633-0.00032-0.
4. Liu G.R., Quek S.S. *The Finite Element Method: A Practical Course*, 2014, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00001-1>.
5. ANSYS Corporation: ANSYS online help, 2010, <https://ansyshelp.ansys.com/>.
6. Xie L., Zhang Y., Ge M., Zhao Y. *Energy Reports*, 2022, no. 8, pp. 718—726, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.214>.
7. Leclerc W., Haddad H., Guessasma M. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, vol. 160, pp. 276—292, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.10.030>.
8. Nienartowicz M., Strek T. *International Center Numerical Methods Engineering*, Gran Capitan, Barcelona, Spain, 2014, pp. 593—604.
9. Ferguson Z., Williams F. *Topology Optimization with FEniCS. Final project for CSCI-GA.2420: Numerical Methods II at New York University*, May 3, 2018, <https://libraries.io/github/zfergus/fenics-topopt>.

Data on authors

- Angelica V. Sizaya** — Student; A. N. Tupolev Kazan State Technical University, Department of Laser Technologies; E-mail: angel.sizaya@gmail.com
- Ilya V. Tsivilskiy** — PhD; A. N. Tupolev Kazan State Technical University, Department of Laser Technologies; Associate Professor; E-mail: ivtsivilskiy@kai.ru

Received 12.12.21; approved after reviewing 17.01.22; accepted for publication 29.03.22.