

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е

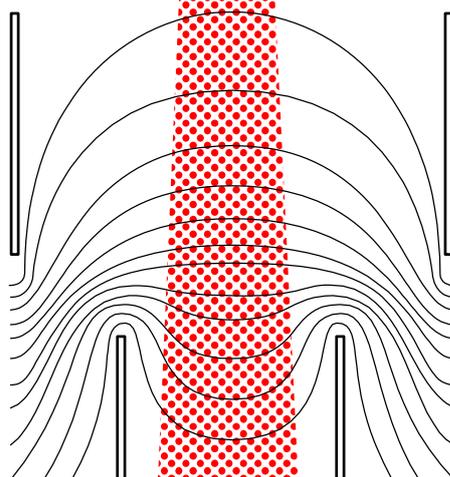
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ **12**

Т. 65
2022

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



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Ответственный секретарь М. В. Лебецкая

Редактор Л. Г. Позднякова

Набор, верстка: М. В. Герасимова

Перевод: Ю. И. Копилевич

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

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

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

Подписано в печать 23.12.2022 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.ifmo.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 (в т.ч. рисунки и таблицы), список литературы.

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.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Аверьянов А. В., Эсаулов К. А., Зыкова С. С. Перспективы использования распределенного бортового вычислительного комплекса в составе орбитальной тросовой системы..... 855

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Иволга Д. В., Насонов К. В., Борисов И. И. Содизайн неполноприводного прыгающего робота: сравнительный анализ виртуального и натурального экспериментов..... 863

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А. Минимизация пульсаций электромагнитного момента в пятифазном асинхронном электроприводе..... 874

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

Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Современные способы испытаний материалов на износ.. 886
Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В.,
Матковская Т. А. Оптическое волокно как основа для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов 895

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Бушуев А. Б., Дударенко Н. А., Литвинов Ю. В., Мансурова О. К. Численная оценка новизны устройства по формуле изобретения..... 902

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Соколов Б. В., Захаров В. В. Методологические основы создания и использования цифровых двойников сложных объектов..... 916

Спесивцев А. В., Павлов А. Н. Особенности выбора факторного пространства при оценивании и прогнозировании состояния сложного объекта..... 920

Потрясаев С. А., Щербакова Е. Е., Коноплев Ю. В. Программно-математическое обеспечение расчета производственных планов судостроительного предприятия.... 925

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2022 г. 930

EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

Executive secretary Marina V. Lebetzkaya

Editor Lidia G. Pozdniakova

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

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

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@itmo.ru

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 65

DECEMBER 2022

№ 12

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

- Averyanov A. V., Esaulov K. A., Zykova S. S. Prospects for the Use of a Distributed Onboard Computer Complex as Part of an Orbital Tether System 855

INSTRUMENTS AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Ivolga D. V., Nasonov K. V., Borisov I. V. Co-Design of an Incomplete-Drive Hopping Robot: Comparative Analysis of Virtual and Full-Scale Experiments 863

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Tomasov V. S., Usoltsev A. A., Vertegel D. A. Minimization of Electromagnetic Torque Pulsations in a Five-Phase Asynchronous Electric Drive 874

INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING

THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

- Efremov L. V., Tikalov A. V. Modern Methods of Testing Materials for Wear 886
- Zenevich A. O., Mansurov T. M., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V., Matkovskaia T. A. Optical Fiber as a Basis for Creating Sensors for Identifying Liquids and Determining the Concentration of Solutions 895

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Bushuev A. B., Dudarenko N. A., Litvinov Yu. V., Mansurova O. K. Numerical Assessment of a Device Novelty According to the Invention Formula 902

BRIEF NOTES

- Sokolov B. V., Zakharov V. V. Methodological Foundations for the Creation and Use of Digital Twins of Complex Objects 916
- Spesivtsev A. V., Pavlov A. N. Features of the Choice of Factor Space in the Estimation and Prediction of the State of a Complex Object 920
- Potryasaev S. A., Scherbakova E. E., Konoplev Yu. V. Software and Mathematical Support for the Calculation of Production Plans of a Shipbuilding Enterprise 925

- THE LIST OF ARTICLES PUBLISHED in 2022 930

To the Authors!

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

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

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

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

Submission includes two copies of:

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

— extended abstract (150—250 words);

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

— illustrations: each on a separate sheet of A4 (not 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

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕННОГО БОРТОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
В СОСТАВЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ**

А. В. Аверьянов*, К. А. Эсаулов, С. С. Зыкова

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия,
vka_24kaf@mil.ru

Аннотация. Рассматриваются перспективы использования распределенного бортового вычислительного комплекса (БВК) в составе орбитальной тросовой системы (ОТС). Проанализированы возможности применения малых космических аппаратов, являющихся элементами ОТС. Определен состав бортового оборудования базового и малого космических аппаратов. Отмечено, что в его состав обязательно должен быть включен распределенный БВК. Рассматривается структура БВК. В качестве примера возможных математических моделей, описывающих динамику элементов ОТС, приведена упрощенная аналитическая модель движения малого космического аппарата в направлении, перпендикулярном плоскости орбиты базового. Применение распределенного БВК в составе ОТС позволит расширить ее функциональные возможности в околоземном пространстве, повысить надежность и устойчивость функционирования базового космического аппарата и связанных с ним мини- и микроспутников.

Ключевые слова: бортовой вычислительный комплекс, вычислительная система, процессор, оперативная память, малый космический аппарат, орбитальная тросовая система, бортовой комплекс управления, аналитический метод расчета

Ссылка для цитирования: Аверьянов А. В., Эсаулов К. А., Зыкова С. С. Перспективы использования распределенного бортового вычислительного комплекса в составе орбитальной тросовой системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 855—862. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-855-862.

**PROSPECTS FOR THE USE OF A DISTRIBUTED ONBOARD COMPUTER COMPLEX
AS PART OF AN ORBITAL TETHER SYSTEM**

A. V. Averyanov*, K. A. Esaulov, S. S. Zyкова

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
vka_24kaf@mil.ru*

Abstract. The prospects for using a distributed onboard computer complex as a part of an orbital tether system are considered. The possibilities of using small spacecraft, which are elements of the orbital tether system, are analyzed. The composition of the onboard equipment of the basic and small spacecraft is determined. It is noted that a distributed onboard computer complex must be included in its composition. The structure of onboard computer complex is discussed. As an example of possible mathematical models describing the dynamics of orbital tether system elements, a simplified analytical model of the movement of a small spacecraft in the direction perpendicular to the base orbital plane is given. The use of a distributed onboard computer complex as part of the orbital tether system is shown to expand its functionality in the near-Earth space, improve the reliability and stability of the base spacecraft and associated mini- and microsatellites operation.

Keywords: onboard computer complex, computing system, processor, RAM, small space vehicle, orbital tether system, onboard control complex, analytical calculation method

For citation: Averyanov A. V., Esaulov K. A., Zykova S. S. Prospects for the use of a distributed onboard computer complex as part of an orbital tether system. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 855—862 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-855-862.

Концепция орбитальных тросовых систем утвердилась как одно из перспективных направлений развития современной космонавтики. Использование орбитальных тросовых систем (ОТС) может повысить эффективность функционирования как отдельного космического аппарата (КА), так и орбитальной группировки КА в целом [1].

О перспективности применения ОТС говорят следующие факты [2]. На некоторых спутниках, например на американском спутнике „Транзит-1В“, запущенном 13 апреля 1960 г., для замедления вращения вокруг центра масс применялись устройства, включающие грузы на тросах. После вывода на орбиту грузы освобождаются и тросы начинают разматываться под действием центробежных сил. Момент инерции системы резко возрастает и пропорционально уменьшается угловая скорость вращения спутника. Достигнув номинальной длины, тросы отцепляются и грузы „уносят“ в пространство „отобранный“ у спутника кинетический момент.

В 1966 г. во время полета космических кораблей „Джеммини-11“ и „Джеммини-12“ были проведены эксперименты по движению корабля в связке с ракетной ступенью „Аджена“. Длина синтетического троса составляла 30 м. Связка с „Джеммини-11“ была приведена во вращательное движение, а связка с „Джеммини-12“ в конечном счете была приведена в состояние гравитационной стабилизации, при котором трос расположен вдоль местной вертикали.

В 1974 г. сотрудниками астрофизической обсерватории Смитсоновского института (США) была выдвинута идея создания субспутника, привязанного к орбитальному самолету тросом длиной 100 км, для измерения параметров гравитационного и магнитного полей Земли и атмосферы на низких орбитах.

В 1984 г. НАСА и Европейское космическое агентство определили программу первых трех полетов привязной спутниковой системы на базе орбитального самолета, которые планировались на 1987—1990 гг., однако после катастрофы „Челленджера“ в 1986 г. были отложены. В первом и третьем полетах предполагалось проведение испытаний электромагнитного мотор-генератора, использующего взаимодействие проводящего троса с магнитным полем Земли. Длина троса толщиной 1—3 мм должна была составить 20 км. Во втором полете предполагалось изучить поведение 100-километрового троса с зондом, спущенным в атмосферу до высоты около 120 км.

На современном этапе развития космонавтики создаются специальные орбитальные структуры на основе искусственных объектов нового типа — малых и сверхмалых космических аппаратов (МКА и СМКА).

К малым относятся КА массой до 500 кг, к сверхмалым — КА массой менее 100 кг. Число таких спутников в орбитальных структурах может колебаться от нескольких единиц и до нескольких десятков [3]. Их широкое применение обусловлено относительно низкой стоимостью выведения на околоземные орбиты, эффективностью использования для дистанционного зондирования Земли, в телекоммуникационных системах, в научных исследованиях космического пространства.

Дальнейшим шагом может являться использование малых КА в составе ОТС, состоящей из базового КА и запускаемого с их борта миниспутника (масса меньше 300 кг) или микроспутника (масса меньше 100 кг), соединенных с бортом базового объекта гибкой связью.

тросом. Применение связанных мини-, микроспутников (МС) позволит существенно расширить функциональные возможности бортовой служебной и измерительной аппаратуры обоих компонентов ОТС. Рассмотрим возможные сферы применения связанных малых КА, понимая под ними прежде всего мини- и микроспутники.

Связанный с базовым КА тросом МС может применяться для:

- захвата космических объектов без маневрирования многоцветных транспортных КА;
- связки при межорбитальных и локальных маневрах;
- передачи электроэнергии на объекты, удаленные от орбитальных энергетических установок, и использования связки в качестве источника электроэнергии для орбитальных станций;
- связи с наземными потребителями на низких частотах; длинный трос может использоваться в качестве антенны при радио-астрономических исследованиях;
- удаления приборов за пределы возмущающих факторов базового КА;
- автономного решения навигационной задачи КА в течение всего времени функционирования на околоземной орбите путем использования связанного с ним МС в качестве навигационного зонда;
- исследования верхних слоев атмосферы с использованием специальной аппаратуры, устанавливаемой на МС, спускаемом до высот 100—150 км.

Кроме того, значительная измерительная база между КА и МС, равная длине связывающего их троса (до десятков километров), может использоваться для проведения с высокой точностью измерений положения космических объектов, а также ориентиров, находящихся на поверхности Земли.

Практическое применение ОТС невозможно без включения в состав аппаратуры управления бортового вычислительного комплекса (БВК). Особенность его организации определяется большой протяженностью космического объекта, состоящего из двух узлов: базового КА и связанного с ним посредством троса МС. По сути БВК является вычислительной системой со статической топологией, каждый из двух узлов которой может быть терминальным, т.е. источником или приемником данных. Если трос соединяет N мини- или микроспутников, то на практике получается одномерная топология (линейный массив) — „цепочка“ при $N+1$ узлах с диаметром сети N , степенью узла 2, числом связей N и шириной биссекции 1 [4].

Упрощенная структура возможного варианта распределенного БВК представлена на рис. 1, где 1 — процессорная плата с процессором; 2 — блок оперативной памяти; 3 — периферийные модули, обеспечивающие информационный обмен соответственно с блоками исполнительных органов, бортовой аппаратурой радиолиний, системой навигации и ориентации, бесплатформенной инерциальной навигационной системой, целевой аппаратурой; 4 — аппаратура исполнительных органов, радиолиний, системы навигации и ориентации, инерциальной навигационной системы, целевая аппаратура. Блоки 1—3 в совокупности образуют информационно-вычислительное ядро БВК базового КА.

На борту привязного МС размещены: 5 — процессорная плата с процессором, 6 — блок оперативной памяти, 7 — периферийный модуль, 8 — комплект целевой аппаратуры. Электрическое и информационное сопряжение двух вычислительных узлов обеспечивает тросовая связь.

Рассмотренная организация распределенного БВК позволит разгрузить основной бортовой процессор (1), находящийся на борту базового КА, вынести часть целевой аппаратуры (8), например оптико-электронные средства наблюдения за поверхностью Земли, за его пределы. Бортовой процессор (5) может взять на себя часть функций по управлению движением как привязного МС, так базового КА, что неизбежно приведет к повышению надежности и устойчивости функционирования всей ОТС.

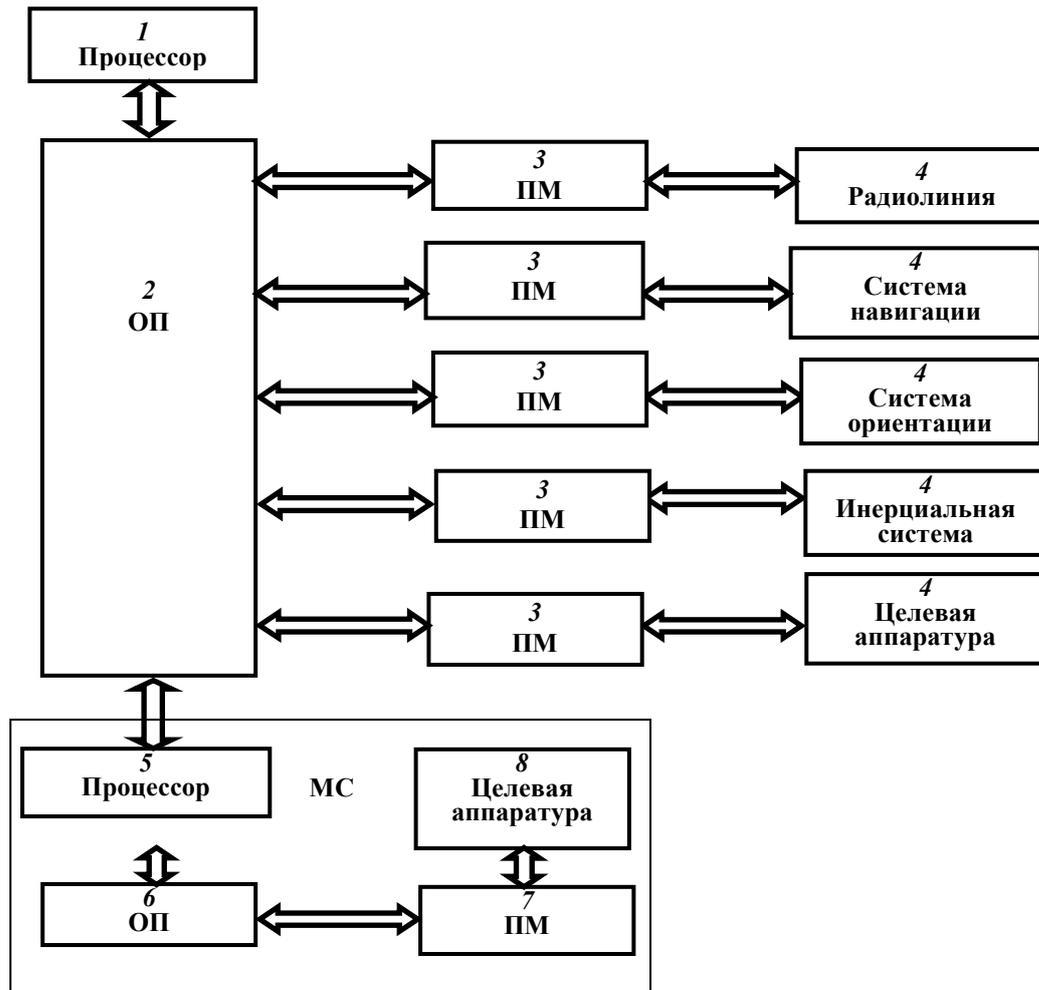


Рис. 1

Известно, что устойчивость функционирования в условиях деструктивных воздействий является важнейшим требованием, предъявляемым как к отдельным КА, так и к орбитальной группировке. Возможные подходы к решению этой задачи рассмотрены в работах [5—9].

Одним из направлений обеспечения устойчивости функционирования КА является создание бортовых комплексов защиты на базе привязных МС. Устойчивость функционирования КА может быть обеспечена путем орбитального маневрирования элементов ОТС [10, 11]. Будем понимать под ОТС систему, состоящую из КА и МС, присоединенного к КА длинным тросом (до нескольких сотен километров), а под термином „трос“ — гибкую нить, обладающую достаточной прочностью на разрыв, низким удельным весом и устойчивостью к воздействию космической среды (рис. 2).

На рис. 2 показано положение МС (точка O_1) в подвижной орбитальной системе координат $O\xi\eta\zeta$, начало которой (точка O) совпадает с центром масс КА (ведущего объекта). Ось $O\eta$ направлена по радиусу-вектору КА \mathbf{r} , который направлен из притягивающего центра — центра масс Земли (точка O_2) в центр масс КА (точка O), ось $O\xi$ направлена по трансверсали, она дополняет систему координат до правой. Положение МС (точка O_1) в подвижной орбитальной системе координат $O\xi\eta\zeta$ определяется радиусом-вектором \mathbf{p} .

Другим направлением повышения устойчивости функционирования КА является обеспечение автономности в течение всего времени существования его на околоземной орбите. Решение этой задачи невозможно без создания системы автономной навигации (САН). Перспективным методом автономной навигации, определяющим структуру и состав САН, является астрозондовый [12]. Этот метод может быть реализован на борту созданием САН, исполь-

зующей вычислительные возможности распределенного БВК (рис. 1), и базирующейся на применении для навигационных целей связанного МС-зонда, что исключает необходимость размещения на борту КА запаса навигационных зондов. Результаты математического моделирования навигационного процесса, в котором в качестве одного из навигационных ориентиров использован МС, связанный с бортом КА, показали, что астрозондовый метод навигации обладает хорошими информационно-точностными характеристиками. С его помощью удастся уточнить элементы начального вектора состояния КА с погрешностями 0,5—2,5 км и 1—2 м/с по координатам и компонентам вектора скорости соответственно.

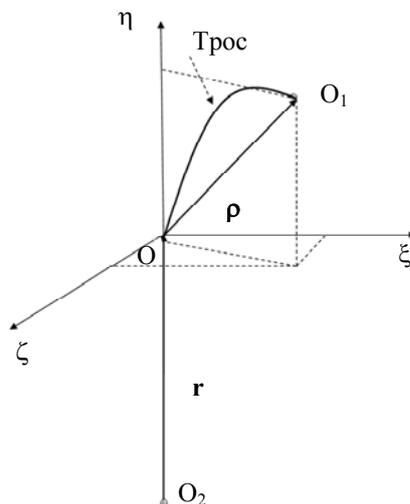


Рис. 2

На современном этапе развития космической техники возникла задача инспекции орбитальных объектов, под которой понимается дистанционное зондирование объекта с целью определения его параметров. Инспектирование орбитального объекта может быть выполнено с использованием МС, связанного с базовым КА. МС приближается на требуемое расстояние к объекту и решает задачи его идентификации, оценивания состояния, вскрытия признаков подготовки и готовности к применению. Развертывание и свертывание ОТС по определенным законам позволит обеспечить широкий класс траекторий движения связанного МС, соответствующих либрационным колебаниям, ротационному и петлеобразному движению, и обеспечивающих решение разнообразных целевых задач по инспектированию орбитальных объектов. К орбитальным объектам инспекции относятся:

- активно функционирующие и пассивные КА военного применения;
- отечественные функционирующие и аварийные КА военного и гражданского назначения;
- орбитальные объекты техногенного происхождения (не функционирующие КА, элементы конструкции ракеты-носителя и КА и т.п.);
- орбитальные объекты природного происхождения (метеоры, кометы, астероиды и т.п.);
- радиационные пояса, области магнитных аномалий и т.п.

ОТС, применяемая для решения задач инспекции орбитальных объектов, является космическим аппаратом-инспектором (КАИ). КАИ — это сложный объект, включающий базовый КА, отделяемый объект дистанционного зондирования (МС) и трос. Возможная область инспекции (доступа, применения) КАИ определяется длиной троса и техническими характеристиками бортовой аппаратуры базового КА и МС.

Рассмотрим в общих чертах состав бортового комплекса базового КА:

- бортовой вычислитель со средствами сопряжения с внешними устройствами (пример реализации представлен на рис. 1, блоки 1—3);

— бортовой специальный комплекс, состоящий из отделяемого МС, устройства запуска МС, бортового комплекса МС и троса;

— бортовой комплекс управления, состоящий из командной программно-траекторной радиолинии, системы управления бортовой аппаратурой, системы управления движением и навигации, системы управления бортовым специальным комплексом, системы управления бортовым обеспечивающим комплексом;

— бортовой обеспечивающий комплекс, состоящий из системы энергоснабжения, системы обеспечения теплового режима, топливной системы, двигательной установки.

Наличие тросовой связи обеспечивает многоразовое применение связанного отделяемого объекта дистанционного зондирования — МС. Разнообразие целевых функций связанного МС предполагает гибкую настраиваемую структуру его бортового комплекса.

Возможный вариант бортового настраиваемого комплекса МС включает:

— бортовой вычислитель со средствами сопряжения с внешними устройствами (рис. 1, блоки 5—7);

— систему ориентации и стабилизации;

— систему управления бортовой аппаратурой;

— сменные модули видеоаппаратуры, радиолокационной, радиометрической и тепловизионной аппаратуры.

Анализ разнообразных возможностей применения ОТС требует создания точных сложных моделей динамики элементов тросовой системы в положении равновесия, либрационных колебаний, развертывания и свертывания, ротационного движения. Конкретные математические модели динамики ОТС представлены в работах [1, 2].

Исследование относительного движения связанного мини-, микроспутника может быть осуществлено с использованием упрощенных моделей (круговое движение КА, масса КА значительно больше массы МС, нерастяжимый и безмассовый трос, центральное гравитационное поле тяготения, отсутствие атмосферы). Именно такой подход был использован при аналитическом расчете бокового относительного движения МС [10, 11].

Боковое движение МС, связанного с базовым КА тросом, описывается уравнением вида [13]:

$$\zeta = \zeta_0 \cos(\omega t) + \zeta'_0 \omega^{-1} \sin(\omega t) + \omega^{-1} \int_0^t W(\tau) \sin[\omega(t - \tau)] d\tau,$$

где ω — угловая скорость движения КА (точки О) по круговой орбите вокруг притягивающего центра — центра Земли (точка O_2 на рис. 2); ζ_0, ζ'_0 — начальные условия запуска МС (штрих обозначает дифференцирование по времени t); τ — время, удовлетворяющее условию $0 \leq \tau \leq t$; $W(\tau)$ — управляющее ускорение, действующее по оси $O\zeta$. В представленном выражении первое и второе слагаемые определяют боковое относительное движение МС, задаваемое начальными условиями его запуска с борта КА, интегральный член задает управляющее воздействие, реализуемое изменением силы натяжения троса. Закономерности в изменении относительного удаления МС в боковом направлении при различных видах управляющего воздействия рассмотрены в [10, 11].

Из приведенного примера модели движения связанного МС видно, что даже при значительном упрощении и сделанных существенных допущениях модель способна раскрыть основные закономерности в движении элементов ОТС, что позволяет сформулировать базовые подходы к ее практическому использованию.

Габаритно-весовые характеристики связанного МС на борту КА вполне приемлемы для решения специальных задач. Большое влияние на эти характеристики оказывают материалы, из которых может быть изготовлен трос. Этот фактор, а также конструкция троса во многом определяют надежность функционирования тросового соединения. Перечень высокопрочных

материалов, применяемых для реализации ОТС, включает стекловолокна, нити из бора, кварцевые нити, синтетическое волокно СВМ, текстильные жгуты на основе графитовых волокон, кевлар. В качестве перспективного материала следует отметить углеродные нанотрубки, обладающие большой предельной прочностью на разрыв и малой объемной плотностью. Эти материалы позволяют обеспечить массу троса в пределах 10—15 кг, а объем, требуемый для его размещения, 7—10 дм³.

КА и связанный с ним посредством троса малый КА — это принципиально новый, нетрадиционный космический объект, характеризующийся большой протяженностью и обладающий огромным потенциалом решения прикладных задач, касающихся дистанционного зондирования Земли, околоземного пространства, орбитальных объектов и определения параметров движения базового КА. Эффективное функционирование ОТС невозможно без использования на космических объектах распределенного БВК, являющегося по своей сути вычислительной системой. Применение распределенного БВК в составе ОТС позволит расширить ее функциональные возможности в околоземном пространстве, повысить надежность и устойчивость функционирования базового КА и связанных с ним мини- и микроспутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. В., Ситарский Ю. С. Динамика полета системы гибко связанных космических объектов. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
2. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
3. Инфраструктура малых космических аппаратов / Под ред. докт. техн. наук, засл. деятеля науки РФ, проф. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2011. 432 с.
4. Орлов С. А., Цилькер Б. Я. Организация ЭВМ и систем: учебник для вузов. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 668 с.
5. Аверьянов А. В., Барановский А. М., Эсаулов К. А. Определение пределов аппаратной избыточности информационных управляющих систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 3. С. 23—26.
6. Аверьянов А. В., Эсаулов К. А., Молчанов О. Е., Белая Т. И. Система автономной навигации малого космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 1. С. 14—17.
7. Аверьянов А. В., Калюжный А. В., Кузнецов В. В. Методика обоснования функционального распределения малых космических аппаратов в кластере дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 620—625.
8. Аверьянов А. В., Кузнецов В. В., Калюжный А. В. Оценивание надежности функционирования многоканальной системы на примере бортового комплекса управления малого космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 880—887.
9. Проблемные вопросы проектирования и эксплуатации бортовых и наземных систем управления объектов ракетно-космической техники РВСН. НТК (21—22 октября 1999 г.). Тез. докл. МО РФ, 1999. 78 с.
10. Вопросы анализа и синтеза систем управления, контроля и диагностики. Учеб. пособие / Под ред. докт. техн. наук, проф. В. В. Смирнова. Л.: МО СССР, 1990. С. 68—71.
11. Аверьянов А. В. Аналитический метод расчета движения малого космического аппарата, связанного с базовым космическим аппаратом // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 75—77.
12. Порфирьев Л. Ф., Смирнов В. В., Кузнецов В. И. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
13. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственного спутника Земли. М.: Наука, 1965. 540 с.

Сведения об авторах

Алексей Васильевич Аверьянов — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka_24kaf@mil.ru

- Константин Андреевич Эсаулов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; старший преподаватель; E-mail: vka_24kaf@mil.ru
- Светлана Сергеевна Зыкова** — адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра информационно-вычислительных систем и сетей; E-mail: vka_24kaf@mil.ru

Поступила в редакцию 13.07.2022; одобрена после рецензирования 21.07.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

- Ivanov A.V., Sitarsky Yu.S. *Dinamika poleta sistemy gibko svyazannykh kosmicheskikh ob'yektov* (Flight Dynamics of a System of Flexibly Coupled Space Objects), Moscow, 1986, 248 p. (in Russ.)
- Beletsky V.V., Levin E.M. *Dinamika kosmicheskikh trosovykh sistem* (Dynamics of Space Tether Systems), Moscow, 1990, 336 p. (in Russ.)
- Fateev V.F., ed., *Infrastruktura malyx kosmicheskikh apparatov* (Infrastructure of Small Spacecraft), Moscow, 2011, 432 p. (in Russ.)
- Orlov S.A., Tsilker B.Ya. *Organizatsiya EVM i sistem* (Organization of Computers and Systems), St. Petersburg, 2011, 668 p. (in Russ.)
- Averyanov A.V., Baranovsky A.M., Esaulov K.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 3(57), pp. 23–26. (in Russ.)
- Averyanov A.V., Esaulov K.A., Molchanov O.E., Belaya T.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 1(58), pp. 14–17. (in Russ.)
- Averyanov A.V., Kalyuzhnyi A.V., Kuznetsov V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 8(64), pp. 620–625. (in Russ.)
- Averyanov A.V., Kuznetsov V.V., Kalyuzhnyi A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 10(63), pp. 880–887. (in Russ.)
- Problemnyye voprosy proyektirovaniya i ekspluatatsii bortovykh i nazemnykh sistem upravleniya ob'yektov raketno-kosmicheskoy tekhniki RVSN* (Problematic Issues of Design and Operation of Onboard and Ground Control Systems for Objects of Rocket and Space Technology of the Strategic Missile Forces), Scientific and technical conference (October 21–22, 1999), Abstracts of reports, Ministry of Defense of the Russian Federation, 1999, 78 p. (in Russ.)
- Smirnov V.V., ed., *Voprosy analiza i sinteza sistem upravleniya* (Questions of Analysis and Synthesis of Control Systems), Leningrad, 1990, pp. 68–71. (in Russ.)
- Averyanov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 4(52), pp. 62–65. (in Russ.)
- Porfir'yev L.F., Smirnov V.V., Kuznetsov V.I. *Analiticheskiye otsenki tochnosti avtonomnykh metodov opredeleniya orbit* (Analytical Estimates of the Accuracy of Autonomous Methods for Determining Orbits), Moscow, 1987, 280 p. (in Russ.)
- Elyasberg P.E. *Vvedeniye v teoriyu poleta iskusstvennogo sputnika Zemli* (Introduction to the Theory of Flight of an Artificial Satellite of the Earth), Moscow, 1965, 540 p. (in Russ.)

Data on authors

- Aleksey V. Averyanov** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Calculation Systems and Nets; E-mail: vka_24kaf@mil.ru
- Konstantin A. Esaulov** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Calculation Systems and Nets; Senior Lecturer; E-mail: vka_24kaf@mil.ru
- Svetlana S. Zyкова** — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Information Calculation Systems and Nets; E-mail: vka_24kaf@mil.ru

Received 13.07.22; approved after reviewing 21.07.2022; accepted for publication 31.10.2022.

**СОДИЗАЙН НЕПОЛНОПРИВОДНОГО ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА:
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИРТУАЛЬНОГО И НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Д. В. ИВОЛГА*, К. В. НАСОНОВ, И. И. БОРИСОВ

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

Аннотация. Рассмотрены прямая и обратная задачи проектирования неполноприводного прыгающего робота, способного осуществлять энергоэффективную динамическую локомоцию. Представлено решение прямой задачи проектирования: имитационное моделирование робота в виртуальной среде в целях изучения его поведения и производительности. Приведено решение обратной задачи проектирования: формирование требований и поиск параметров робота, обеспечивающих его наилучшую производительность. Содизайн заключается в одновременном поиске механической конструкции и траекторий движения робота; оценка поведения и производительности рассматриваемой системы осуществляется в виртуальной имитационной среде. Так как имитационное моделирование не в полной мере отражает протекающие в реальной жизни процессы, апробированные исключительно в виртуальной среде результаты проектирования не могут в полной мере описывать результаты реального эксперимента и заменять их. Сравниваются результаты виртуального и натурального экспериментов макета неполноприводного прыгающего робота, приведено обоснование расхождений полученных данных.

Ключевые слова: *прямая задача проектирования, обратная задача проектирования, неполноприводный робот, морфологический расчет, содизайн*

Благодарности: работа поддержана грантом Президента Российской Федерации (№ МК-2081.2022.4).

Ссылка для цитирования: *Иволга Д. В., Насонов К. В., Борисов И. И.* Содизайн неполноприводного прыгающего робота: сравнительный анализ виртуального и натурального экспериментов // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2022. Т. 65, № 12. С. 863—873. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-863-873.

**CO-DESIGN OF AN INCOMPLETE-DRIVE HOPPING ROBOT:
COMPARATIVE ANALYSIS OF VIRTUAL AND FULL-SCALE EXPERIMENTS**

D. V. Ivolga*, K. V. Nasonov, I. I. Borisov

ITMO University, St. Petersburg, Russia
**ivolga.dv@itmo.ru*

Abstract. The forward and inverse design tasks of an incomplete-drive hopping robot capable of energy-efficient dynamic locomotion are considered. A solution to the direct design problem of simulating a robot in a virtual environment in order to study its behavior and performance is presented. A solution of the inverse design problem is obtained, which consists in the formation of requirements and the search for robot parameters that ensure its best performance. Since simulation modeling does not fully reflect the processes occurring in real life, the design results tested exclusively in a virtual environment cannot fully describe the results of a real experiment and replace them. The results of virtual and full-scale experiments of a prototype of a non-wheel drive jumping robot are compared, and the rationale for the discrepancies in the data obtained is given.

Keywords: forward design task, inverse design task, incomplete-drive robot, morphological computation, co-design

Acknowledgment: the work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (No. МК-2081.2022.4).

For citation: Ivolga D. V., Nasonov K. V., Borisov I. I. Co-design of an incomplete-drive hopping robot: comparative analysis of virtual and full-scale experiments. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 863—873 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-863-873.

Введение. Среди всех возможных структур роботов наиболее широко используется полноприводная открытая кинематика: артикулированные роботы-манипуляторы [1], пальцы антропоморфных захватных устройств [2], механизмы ног шагающих роботов [3] и др. Полноприводная кинематика является универсальным средством для выполнения разнообразных движений, поскольку способна двигаться в произвольном направлении, точно следовать требуемым траекториям, физически взаимодействовать с окружающей средой.

С момента появления промышленных роботов к ним предъявлялись требования по высокой точности позиционирования, скорости перемещения, повторяемости и грузоподъемности. В условиях структурированной среды производственных цехов и отсутствия жестких требований по энергоэффективности требуемые характеристики обеспечиваются механизмами открытой и параллельной кинематики, состоящими из жестких, соединенных дискретными сочленениями, звеньев. Жесткие звенья способны выдерживать больше нагрузки, дискретные сочленения позволяют точно управлять движением. Задачи проектирования подобных конструкций и синтеза алгоритмов управления ими хорошо изучены и, в том числе, обеспечены аналитическими методами.

Несмотря на очевидные преимущества, необходимость большого количества актуаторов для управления такого рода конструкциями влечет за собой повышение требований к производительности приводов и точности датчиков, а также возрастание сложности управления, энергопотребления, веса и габаритов, общей стоимости робота [4].

Морфологический расчет законов управления. Новое поколение роботов необходимо для обеспечения *сервиса, логистики, инспекции, обработки и сборки* — решать эти задачи невозможно, если роботы не способны *адаптивно и безопасно* взаимодействовать с неструктурированным окружением в условиях ограниченных *энергетических* запасов. Сформировавшихся и ставших традиционными принципов анализа, конструирования и управления недостаточно, когда перед проектировщиком стоят жесткие ограничения по производительности и запасу набортовой энергии [5]. Параметр „энергоэффективность“, прежде всего, означает бережный расход энергии без ограничения производительности робота. Естественная динамика механической системы не должна отменяться системой управления, ее следует учитывать при проектировании робота. Согласно принципам морфологического расчета законов управления (*morphological computation*) [6, 7] и физического воплощения интеллекта (*physical intellect embodiment*) [8], основная часть желаемого поведения и динамики может быть заложена на механическом уровне робота, а задача алгоритмического управления сведена к дополнению и стабилизации движения, обусловленного особенностями механического строения и естественной динамики робота. Минимизация управляющего воздействия требует меньшего „участия“ двигателей, что приводит к меньшему энергопотреблению.

Проектирование как задача оптимизации. Запрограммировать робота на выполнение поставленной задачи на механическом уровне можно за счет синтеза механизмов замкнутой кинематики с оптимизацией структуры и геометрических параметров, оптимизации распределения массы между звеньями и оптимизации распределения эластичности. Процесс проектирования подобных конструкций зачастую носит неформализованный характер в силу сочетания в робототехнической системе компонентов разной физической природы, стремящегося к бесконечности количества топологий и параметров, разнородных критериев оптимальности

решений, нелинейных целевых функций, несовершенства аналитического аппарата и средств имитационного моделирования и пр. [9].

Для содизайна неполноприводного прыгающего робота был использован нисходящий метод *адаптивной оптимизации* (рис. 1). При проектировании сверху вниз сначала грубо оптимизируется высокоуровневое поведение для конструкции низкой детализации, а затем с каждым этапом постепенно добавляются детали [10].

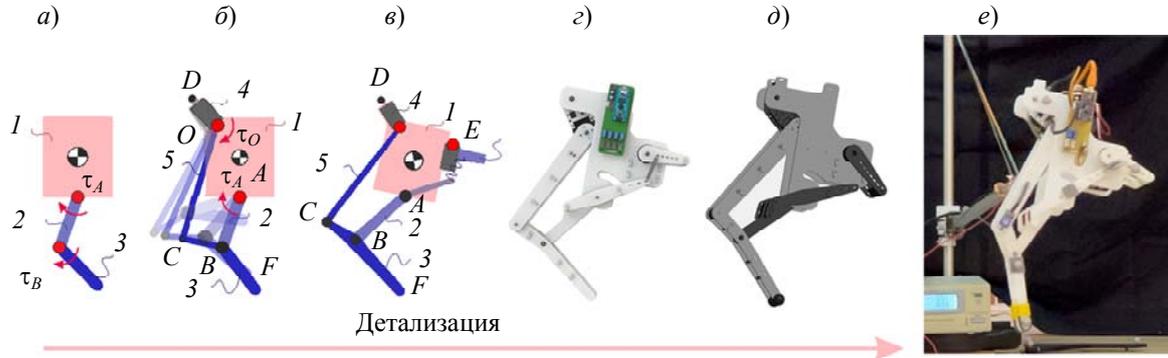


Рис. 1

На первом этапе адаптивной оптимизации прыгающего робота (рис. 1, а—в) решалась задача содизайна для модели, состоящей из звеньев примитивных форм. Для структурно-параметрического синтеза был использован метод, представленный в работах [11, 12], заключающийся в содизайне механизма открытой кинематики (рис. 1, а), последующем замыкании кинематики механизма (рис. 1, б) и интеграции пассивных элементов для адаптивности при контактном взаимодействии и рекуперации энергии (рис. 1, в).

Конструкция в САПР (рис. 1, з) спроектирована по найденным в результате содизайна структуры: длине звеньев и положению сочленений, массе звеньев, параметрам пружины. Детализированная конструкция верифицирована в имитационной среде согласно прямой задаче проектирования (рис. 1, д).

Прямая и обратная задачи применяются для повышения степени автоматизации проектирования (рис. 2) [13]. Прямая задача заключается в имитационном моделировании объекта проектирования в виртуальной среде в целях изучения его поведения и производительности. Изменение параметров исследуемой системы x_0 ведет к изменению поведения и производительности исследуемой системы, оцениваемой эвристической целевой функцией $f(x_0)$.



Рис. 2

В случае обратной задачи проектирования производительность системы определяется путем направленного поиска, обеспечивающего минимизацию (или максимизацию) значения целевой функции. При обратной задаче проектирования поиск решения выполняется автоматизированным способом до тех пор, пока решение не удовлетворяет требуемому значению. Такой подход позволяет эффективно изучить пространство проектирования и найти оптимальное или субоптимальное решение.

Под содизайном робототехнической системы понимается оптимизация механической конструкции совместно с генерацией оптимальных траекторий движения [14—17]. Генерация конструкций роботов, генерация управляющих воздействий и их верификация выполняются

в имитационной среде моделирования с использованием эвристических алгоритмов для эффективного исследования пространства кандидатов и поиска среди них высокопроизводительных решений.

Производительность сгенерированных решений оценивается в среде имитационного моделирования, что неминуемо ведет к расхождению при сравнении результатов моделирования и натурального тестирования физических образцов роботов. Минимизировать разрыв между имитационным моделированием и реальностью возможно, но чем выше точность моделирования, тем больше усилий приходится затрачивать на создание, верификацию и валидацию модели [9, 10].

Прямая задача проектирования прыгающего робота. Имитационное моделирование спроектированного неполноприводного прыгающего робота было проведено в среде MatLab с использованием пакетов Simscape Multibody, Driveline и Electrical.

1) *Моделирование движения тел.* Все звенья робота, подстилающая поверхность и объекты окружения промоделированы как абсолютно твердые однородные тела. Учтены масса, инерция тел, голономные ограничения, выполнена визуализация моделируемой сцены в трехмерном пространстве. Так как моделирование включено в контур оптимизации, требуется обеспечение высокой скорости моделирования за шаг оптимизации, поэтому не учитываются эластичная и пластичная деформации, ползучесть, износ пластиковых деталей, люфт в сочленениях.

2) *Моделирование контактного взаимодействия* заключается в расчете силы по нормали к контактной поверхности f_n и силы трения f_f , действующей в плоскости контакта. Для расчета f_n был использован метод штрафов [18, 19], при котором геометрия контактируемых объектов пересекается в момент соударения, а сила рассчитывается по линейно-вязкой модели:

$$f_n = k_c x + b_c \dot{x},$$

где k_c и b_c — коэффициенты жесткости (Н/м) и демпфирования контактного взаимодействия (Нс/м) соответственно; x — глубина проникновения контактных поверхностей друг в друга (м). Горизонтальная составляющая контактной силы — сила трения f_f — рассчитывается как функция, которая зависит от компонентов трения Штрибека F_s , трения Кулона F_c и трения вязкости F_v :

$$f_f = \sqrt{2e} \cdot (F_b - F_c) \exp\left(-\left(\frac{v}{v_s}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{v}{v_s}\right) + F_c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{v}{v_c}\right) + \mu v,$$

где $F_b = F_s + F_c + F_v$ — сила трения отрыва (Н); $v_s = v_b \sqrt{2}$ и $v_c = v_b / 10$ — пороги скорости Штрибека и скорости Кулона соответственно (м/с); v_b — скорость трения отрыва (м/с); v — скорость контактирующих тел относительно друг друга (м/с); μ — коэффициент трения.

3) *Моделирование эластичных элементов* осуществлялось по линейно-вязкой модели вида „пружина—демпфер“:

$$F_e = k\Delta p + b\Delta \dot{p},$$

где F_e — генерируемая сила; k , b — скалярные коэффициенты жесткости (Н/м) и демпфирования (Нс/м) соответственно; Δp — деформация пружины (м).

4) *Модель главного и вспомогательного сервомотора* состоит из моделей двигателей постоянного тока, редуктора и контура системы управления. Модель позволяет учесть электромеханическую составляющую сервомоторов при апробации прыгающего робота, тем самым определив параметры реальных приводов для физического прототипа.

Генерируемый мотором постоянного тока крутящий момент T описывается упрощенной моделью с учетом электромеханических характеристик:

$$T = \frac{k_t}{R}(V - k_v \omega) - J\dot{\omega} - \frac{k_t i_{xx}}{\omega_{xx}} \ddot{\omega},$$

где R — сопротивление обмоток ротора, k_t — постоянный коэффициент крутящего момента, k_v — константа противо-ЭДС, ω — угловая скорость ротора, где i_{xx} — ток холостого хода, ω_{xx} — угловая скорость вращения ротора на холостом ходу. Модель отражает основные динамические характеристики мотора, в то же время используемые величины на практике указываются в спецификации к моторам или определяются экспериментально [20].

Модель редуктора описывает зависимость между входным движением вала двигателя постоянного тока и выходом редуктора, с учетом КПД редуктора η :

$$\begin{cases} T_s = i_{gb} T - T(1 - \eta), \\ \omega_s = \frac{\omega}{i_{gb}}, \end{cases}$$

где T_s и ω_s — крутящий момент и угловая скорость на выходе сервомотора.

Управление по положению сервомотором осуществляется с помощью ПД-регулятора:

$$V = eK_p + \dot{e}K_d,$$

где V — подаваемое на мотор постоянного тока напряжение, $e = q_c - q_d$ — ошибка по положению (q_c и q_d — текущий и требуемый углы поворота), K_p и K_d — пропорциональный и дифференцирующий коэффициенты регулирования.

Модель сервомотора является идеализированной, чтобы упростить процедуру расчета и уменьшить время моделирования. В ней не учитываются электромагнитные потери, термодинамические процессы, связанные с рассеиваемой энергией, трение, люфт, помехи и задержки в контуре управления. Данные параметры в большей степени необходимы для количественной оценки надежности работы привода при постоянной нагрузке.

Обратная задача проектирования прыгающего робота. Целью решения обратной задачи проектирования является нахождение морфологии робота и траекторий сочленений, которые обеспечивают требуемую производительность и поведение.

1) *Цель содизайна.* Численная оценка поведения и производительности робота при рассматриваемых значениях переменных осуществляется с помощью эвристической целевой функции вознаграждения по итогам тестирования робота в имитационной среде. Для поведения, соответствующего прыжку на месте, функция вознаграждения имеет следующий вид:

$$f_J = \frac{\tilde{h}_F^2 t^2}{1 + |\tilde{x}_B|},$$

для поведения, соответствующего бегу,

$$f_R = \text{sgn}(x_B) x_B^2 \tilde{h}_F^2 t^2,$$

где \tilde{h}_F — средняя высота прыжка для точки контакта робота с полом, t — время процесса моделирования, x_B и \tilde{x}_B — абсолютное и среднее значение пройденного расстояния вдоль оси \hat{x} для тела соответственно.

2) *Входные и выходные данные.* В общем виде на вход подается структура вида

$$\mathcal{G}_{in}^l = (\mathcal{N}, \mathcal{T}, \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{S}),$$

где множества \mathcal{N} и \mathcal{T} несут информацию о структуре механизма, \mathcal{N} содержит нетерминальные символы, \mathcal{T} — терминальные символы графа; множество \mathcal{A} — характеристики символов, которые несут информацию о непрерывных переменных:

$$\mathcal{A} = (\mathbf{l}, \mathbf{p}, \mathbf{i}, \boldsymbol{\beta}),$$

где $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^u$ — вектор длин звеньев, $u \in \mathbb{N}$ — число звеньев, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{c \times 2}$ — вектор систем координат точек присоединения звеньев, $c \in \mathbb{N}$ — число поводков, $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^l$ — вектор масс звеньев, $\boldsymbol{\beta} \in \mathbb{R}^{o \times 4}$ — вектор параметров пружин, $o \in \mathbb{N}$ — число пружин, \mathcal{R} — грамматические правила сборки терминальных и нетерминальных символов, \mathcal{S} — начальные элементы графа. Грамматические правила \mathcal{R} описывают способы образования структуры механизма.

На выходе формируется структура $\mathcal{G}_{\text{out}}^l$, которая несет всю информацию о структуре, геометрических параметрах и траекториях движения сочленений механизмов пальцев открытой кинематики для захватного устройства или роботизированной кисти

$$\mathcal{G}_{\text{out}}^l = (\mathcal{T}, \mathcal{A}, \mathcal{E}, \mathcal{J}),$$

где $\mathcal{E} \in \mathbb{N}^{g \times g}$ — матрица связности терминальных элементов механизма \mathcal{T} , $g \in \mathbb{N}$ — число элементов механизма, $\mathcal{J}(t) \in \mathbb{R}^l$ — матрица с траекториями всех приводных сочленений, $l \in \mathbb{N}$ — число звеньев.

3) *Ограничения.* Поскольку оптимизация основана на имитационном моделировании, всех нежелательных сценариев можно избежать, установив условия для прерывания моделирования. Например, задать граничные условия для положения тела робота вдоль вертикальной оси $z_B \in [z_{B\min}; z_{B\max})$ и для средней высоты прыжка $\tilde{h}_F \in [\tilde{h}_{F\min}; \infty)$.

4) *Оптимизация.* Целью содизайна прыгающего робота является поиск переменных для $\mathcal{G}_{\text{out}}^l$, т.е. структуры, длин звеньев и положений сочленений, масс звеньев, параметров пружин, а также траекторий активных сочленений, при которых достигается максимум функции вознаграждения:

$$f(\mathcal{G}_{\text{out}}^l) = \max \{k_j f_J + k_r f_R\},$$

где k_j и k_r — весовые коэффициенты.

Задача содизайна решена с помощью MatLab Global Optimization Toolbox. Для решения задачи оптимизации использованы генетические алгоритмы глобальной оптимизации.

Конструкция прыгающего робота. Для верификации результатов моделирования создан физический прототип прыгающего робота (см. рис. 1, *e*). Конструкция робота (рис. 1, *z*) создана на основе топологии, полученной в результате оптимизации (рис. 1, *a—в*). Большинство деталей прототипа адаптированы для изготовления методом лазерной резки, что значительно увеличивает скорость прототипирования. Основным конструкционным материалом является полиоксиметилен, обладающий низким коэффициентом трения, высокими ударопрочностью и износостойкостью. Для сопряжения деталей вместо крепежа используется клипсовое соединение, что снижает общий вес и увеличивает скорость сборки. Оси изготовлены на токарном станке из стали 45. Благодаря симметричной конструкции возможно подключение пружин с обеих сторон. Это решение позволяет гибко регулировать коэффициент жесткости за счет параллельности пружин. Для прототипа пружины выбраны в соответствии с данными, полученными в результате оптимизации. Изготовленный прототип весит 430 г.

Структура аппаратной части системы управления приведена на рис. 3. В качестве основного и вспомогательного двигателя выбран сервопривод Dynamixel AX-18A, обеспечивающий необходимый крутящий момент и скорость, а также позволяющий определять широ-

кий спектр данных обратной связи. Измерение угла колена осуществляется с помощью потенциометра CJMCU-103. Для управления сервоприводами и считывания сигнала с датчика разработана плата расширения на основе Arduino Nano Every. Согласование интерфейса между сервомоторами и Arduino осуществлялось с помощью микросхемы 74LVC2G241. Усиление и фильтрация сигнала с датчика углового положения колена производились посредством инструментального усилителя AD623.

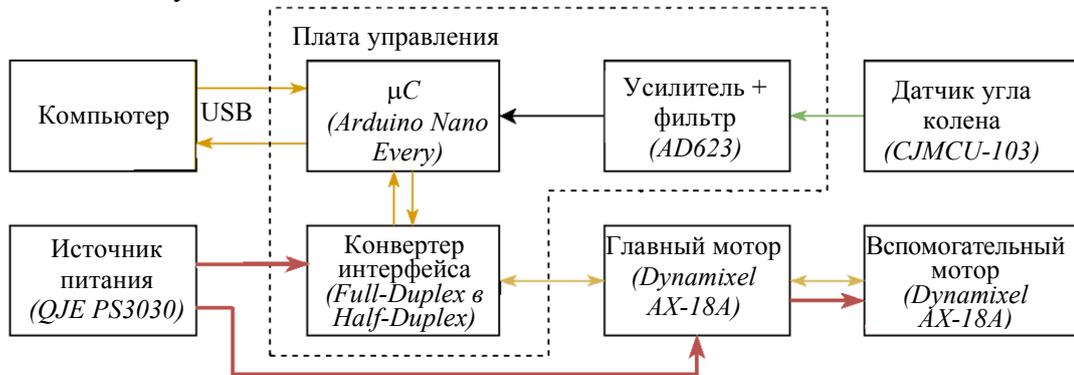


Рис. 3

Сравнительный анализ виртуального и натурального экспериментов. Для сравнительного анализа результатов моделирования и реального поведения прыгающего робота протестирован разработанный прототип. На рис. 4 приведена последовательность изображений для бега. Прыгающий робот имеет две степени свободы: вдоль вертикальной \hat{z} и горизонтальной оси \hat{x} . Чтобы ограничить все остальные степени свободы, к корпусу робота жестко прикреплен соединительный стержень длиной 1,15 м. Другой конец стержня соединен со стойкой с помощью двух вращательных сочленений, которые обеспечивают рыскание и вращение по крену вокруг неподвижного основания. Для компенсации веса стержня использован эластичный трос, натянутый между основанием и стержнем.



Рис. 4

Движение робота было захвачено с помощью систем отслеживания в реальном времени *OptiTrack* [21]. Система захвата движения состоит из восьми камер, установленных на одинаковой высоте вокруг испытательного стенда, чтобы охватить всю область действия робота. На роботе установлены отражающие сферы для определения положения и ориентации в пространстве: туловища, стопы и выходного звена робота. Точки крепления сфер идентичны расположению маркеров в имитационной модели. Система откалибрована со средней погрешностью 0,9 мм при длине луча 5,9 м.

Испытания проведены для различных углов настройки двигателя, который задает скорость движения робота. Dynamixel AX-18A предоставляет широкий спектр данных обратной связи, таких как угловое положение, угловая скорость и моменты нагрузки.

На рис. 5 представлены графики виртуального и натурального экспериментов для быстрого (рис. 5, а) и медленного (рис. 5, б) бега: p_b^w и p_b^f — перемещения системы координат робота Ψ_B и точки контакта Ψ_F соответственно, выраженные в мировой системе координат Ψ_W , моменты τ и угловое положение α для обоих двигателей, а также общее энергопотребление P

$$\bar{P} = \bar{\tau}_m \cdot \dot{\bar{\alpha}}_m + \bar{\tau}_c \cdot \dot{\bar{\alpha}}_c,$$

где штрих указывает на экспериментальные данные, индексы m и c указывают на основной и конфигурационный двигателя соответственно. При анализе графиков видно, что в самом быстром режиме для прохождения дистанции требуется меньше времени.

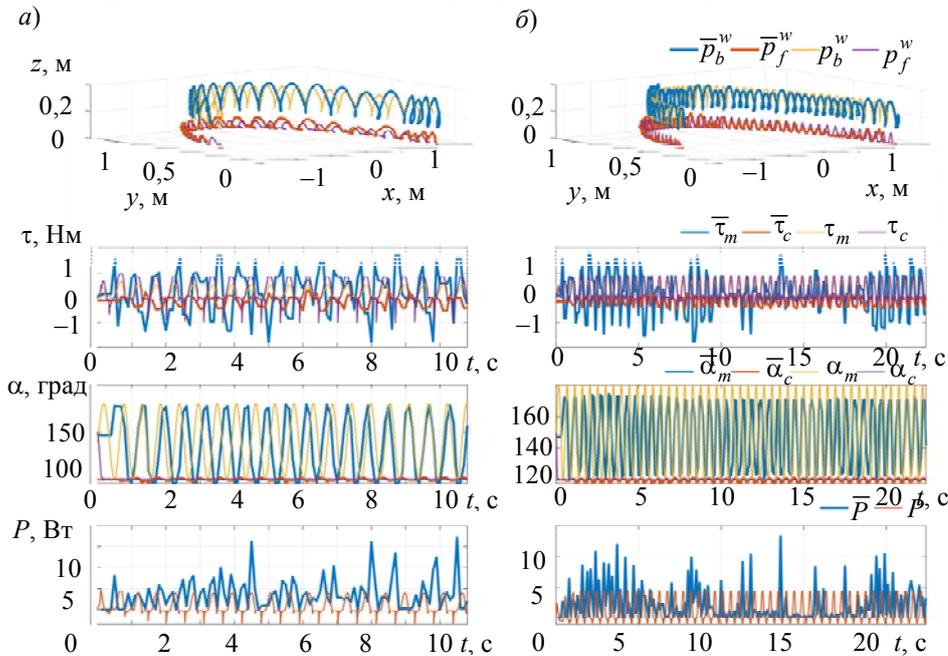


Рис. 5

Рис. 6 демонстрирует стоимость перемещения для быстрого СП_а и медленного СП_б перемещения

$$СП = \frac{E}{m_p d},$$

где E — значение энергии, затраченной на перемещение, m_p — масса робота, а d — пройденное расстояние.

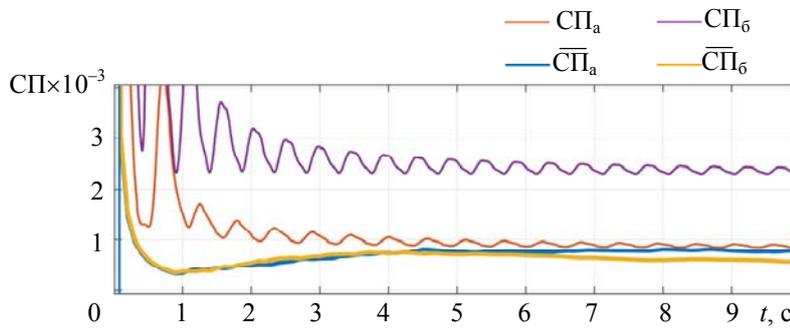


Рис. 6

Порядок данных виртуального и натурального экспериментов одинаков: в частности, амплитуды перемещения по вертикали для корпуса и ступни, порядок моментов на двигателях, амплитуда и частота движения входных звеньев как при быстром там и при медленном беге. Отсутствие части данных в паспорте (параметры индуктивности и сопротивления обмоток, момент инерции ротора и электромеханической составляющей, КПД) серводвигателя, эмпи-

рически подобранные коэффициенты контактного взаимодействия, отсутствие люфтов и деформаций пластиковых деталей, линейные модели для пружин растяжения и трения в сочленениях, неучтенные неровности пола и потери на сопротивление со средой приводят к неминуемым несоответствиям между имитационной и реальной средой с точки зрения как визуальных, так и физических свойств.

Полосы пропускания Dynamixel AX-18A недостаточно для снятия данных с высокой частотой, поэтому виртуальный и натуральный эксперименты имеют разное время дискретизации. Например, из рис. 5 видно, что значения C_p при моделировании с меньшим шагом имеют затухающие колебания, но в реальных экспериментах с большим шагом графики C_p являются гладкими.

Заключение. В случае слабоформализованных задач проектирования поиск решения в большинстве случаев до сих пор производится „ручными“ аналитическими методами; при этом результат сильно зависит от опыта и инженерной интуиции специалиста-проектировщика. Творческих способностей человека зачастую недостаточно для проектирования энергоэффективных и адаптивных робототехнических систем с морфологическим расчетом законов управления и физического воплощенного искусственного интеллекта, что связано с неограниченностью пространства решений, непрерывным характером работы деформируемых тел, несовершенством аналитического аппарата и средств имитационного моделирования.

Процесс проектирования путем решения обратной задачи автоматизируется благодаря средствам имитационного моделирования. Однако проблема имитационного моделирования заключается в том, что даже лучшие из доступных симуляторов не в полной мере отражают процессы, протекающие в реальности. При создании имитационных моделей необходимо аргументированно балансировать между степенью детализации модели и быстротой ее расчета.

В настоящей работе решена обратная задача проектирования неполноприводного робота со сложной механической конструкцией как оптимизационная задача с расчетом целевой функции по результатам тестирования решения в имитационной среде. Однако модели роботов, апробированные исключительно в искусственных условиях, не могут в полной мере описывать результаты реального эксперимента и заменять их. Для верификации решения был изготовлен физический прототип и проведено сравнение детализированной имитационной модели и физического макета робота.

Исследование проведено в рамках разработки методов, алгоритмов, а также программных продуктов, предназначенных для оптимизации структуры механизмов исполнительных элементов, геометрических параметров с целью обеспечения требуемой кинематики движения, параметров эластостатики и распределения массы для обеспечения требуемой естественной динамики и синтеза алгоритмов управления с целью достижения требуемого поведения неполноприводных роботов, которые должны решать задачи контактного взаимодействия с заранее неизвестным окружением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raiola G. et al. Development of a safety-and energy-aware impedance controller for collaborative robots // IEEE Robotics and automation letters. 2018. Vol. 3, N 2. P. 1237—1244.
2. Rothling F. et al. Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-DOF shadow and 9-DOF TUM hand // 2007 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2007. P. 2951—2956.
3. Lee J. et al. Learning quadrupedal locomotion over challenging terrain // Science robotics. 2020. Vol. 5, N 47. P. eabc5986.
4. Thomaszewski B. et al. Computational design of linkage-based characters // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2014. Vol. 33, N 4. P. 1—9.

5. Roy N. et al. From Machine Learning to Robotics: Challenges and Opportunities for Embodied Intelligence // arXiv preprint arXiv:2110.15245. 2021.
6. Müller V. C., Hoffmann M. What is morphological computation? On how the body contributes to cognition and control // *Artificial life*. 2017. Vol. 23, N 1. P. 1—24.
7. Folkertsma G. A., van der Schaft A. J., Stramigioli S. Morphological computation in a fast-running quadruped with elastic spine // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, N 13. P. 170—175.
8. Howard D. et al. Evolving embodied intelligence from materials to machines // *Nature Machine Intelligence*. 2019. Vol. 1, N 1. P. 12—19.
9. Chen F., Wang M. Y. Design optimization of soft robots: A review of the state of the art // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2020. Vol. 27, N 4. P. 27—43.
10. Pinski J., Howard D. From bioinspiration to computer generation: Developments in autonomous soft robot design // *Advanced Intelligent Systems*. 2022. Vol. 4, N 1. P. 2100086.
11. Borisov I. I. et al. Computational design of reconfigurable underactuated linkages for adaptive grippers // 2021 IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021. P. 6117—6123.
12. Borisov I. I. et al. Reconfigurable Underactuated Adaptive Gripper Designed by Morphological Computation // 2022 Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2022. P. 1130—1136.
13. Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories / Ed. by E. Gasparri et al. Woodhead Publishing, 2021.
14. Sims K. Evolving virtual creatures // *Proc. of the 21st Ann. Conf. on Computer graphics and interactive techniques*. 1994. P. 15—22.
15. Geijtenbeek T., Van De Panne M., Van Der Stappen A. F. Flexible muscle-based locomotion for bipedal creatures // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2013. Vol. 32, N 6. P. 1—11.
16. Wang T. et al. Neural graph evolution: Towards efficient automatic robot design // arXiv preprint arXiv:1906.05370. 2019.
17. Zhao A. et al. Robogrammar: graph grammar for terrain-optimized robot design // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2020. Vol. 39, N 6. P. 1—16.
18. Marhefka D. W., Orin D. E. Simulation of contact using a nonlinear damping model // *Proc. of IEEE Intern. Conf. on robotics and automation*. IEEE, 1996. Vol. 2. P. 1662—1668.
19. Hwang Y. et al. An order n dynamic simulator for a humanoid robot with a virtual spring-damper contact model // 2003 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422). IEEE, 2003. Vol. 1. P. 31—36.
20. Horowitz P., Hill W., Robinson I. *The art of electronics*. Cambridge: Cambridge university press, 1989. Vol. 2. P. 658.
21. Nagymáté G., Kiss R. M. Application of OptiTrack motion capture systems in human movement analysis: A systematic literature review // *Recent Innovations in Mechatronics*. 2018. Vol. 5, N 1. P. 1—9.

Сведения об авторах

- Дмитрий Викторович Иволга** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; инженер; E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
- Кирилл Вячеславович Насонов** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; инженер; E-mail: kvnasonov@itmo.ru
- Иван Игоревич Борисов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; научный сотрудник; E-mail: borisovii@itmo.ru

Поступила в редакцию 31.08.22; одобрена после рецензирования 09.09.22; принята к публикации 31.10.22.

REFERENCES

1. Raiola G. et al. *IEEE Robotics and automation letters*, 2018, no. 2(3), pp. 1237–1244.
2. Rothling F. et al. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2007, pp. 2951–2956.

3. Lee J. et al. *Science robotics*, 2020, no. 47(5), pp. eabc5986.
4. Thomaszewski B. et al. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, no. 4(33), pp. 1–9.
5. Roy N. et al. *arXiv preprint arXiv:2110.15245*, 2021.
6. Müller V.C., Hoffmann M. *Artificial life*, 2017, no. 1(23), pp. 1–24.
7. Folkertsma G.A., van der Schaft A.J., Stramigioli S. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, no. 13(48), pp. 170–175.
8. Howard D. et al. *Nature Machine Intelligence*, 2019, no. 1(1), pp. 12–19.
9. Chen F., Wang M.Y. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2020, no. 4(27), pp. 27–43.
10. Pinskiel J., Howard D. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, no. 1(4), pp. 2100086.
11. Borisov I.I. et al. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2021, pp. 6117–6123.
12. Borisov I.I. et al. *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2022, pp. 1130–1136.
13. Gasparri E. et al., ed., *Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories*, Woodhead Publishing, 2021.
14. Sims K. *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1994, pp. 15–22.
15. Geijtenbeek T., Van De Panne M., Van Der Stappen A.F. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, no. 6(32), pp. 1–11.
16. Wang T. et al. *arXiv preprint arXiv:1906.05370*, 2019.
17. Zhao A. et al. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2020, no. 6(39), pp. 1–16.
18. Marhefka D.W., Orin D.E. *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*, IEEE, 1996, vol. 2, pp. 1662–1668.
19. Hwang Y. et al. *IEEE International*, 2003, vol. 1, pp. 31–36.
20. Horowitz P., Hill W., Robinson I. *The art of electronics*, Cambridge, Cambridge university press, 1989, vol. 2, pp. 658.
21. Nagymáté G., Kiss R. M. *Recent Innovations in Mechatronics*, 2018, no. 1(5), pp. 1–9.

Data on authors

- Dmitry V. Ivolga** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Engineer;
E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
- Kirill V. Nasonov** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Engineer;
E-mail: kvnasonov@itmo.ru
- Ivan I. Borisov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Researcher;
E-mail: borisovii@itmo.ru

Received 31.08.22; approved after reviewing 09.09.22; accepted for publication 31.10.22.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

УДК 004.052.42+681.518.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-874-885

МИНИМИЗАЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА В ПЯТИФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В. С. ТОМАСОВ, А. А. УСОЛЬЦЕВ, Д. А. ВЕРТЕГЕЛ*

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

Аннотация. Рассматривается задача алгоритмической минимизации пульсаций электромагнитного момента в пятифазном асинхронном электроприводе. Предложены принцип построения алгоритма пространственно-векторной модуляции с монотонной траекторией годографа вектора выходного напряжения и алгоритм, позволяющий снизить пульсации момента в диапазоне регулирования частоты вращения 100:1 в среднем более чем в два раза, а в области низких частот вращения — более чем в десять раз, по сравнению с основным алгоритмом, используемым в настоящее время. Это позволяет рассматривать пятифазный асинхронный электропривод в качестве альтернативы синхронному приводу в задачах прецизионного регулирования координат движения. Однако при частоте вращения выше половины номинальной наблюдаются резонансные явления, приводящие к пульсациям момента до 30 %, что требует принятия особых мер и может полностью исключить возможность применения такого привода для целого ряда задач.

Ключевые слова: *пятифазный привод, алгоритм модуляции, пульсации момента, минимизация пульсаций момента*

Благодарности: работа выполнена при поддержке программы „Приоритет 2030“.

Ссылка для цитирования: *Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А.* Минимизация пульсаций электромагнитного момента в пятифазном асинхронном электроприводе // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 874—885. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-874-885.

MINIMIZATION OF ELECTROMAGNETIC TORQUE PULSATIONS IN A FIVE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

V. S. Tomasov, A. A. Usoltsev, D. A. Vertegel*

ITMO University, St. Petersburg, Russia
* vertegeldenis@gmail.com

Abstract. The problem of algorithmic minimization of electromagnetic torque pulsations in a five-phase asynchronous electric drive is considered. The principle of constructing an algorithm for space-vector modulation with a monotonic trajectory of the hodograph of the output voltage vector and an algorithm that makes it possible to reduce the torque ripples in the speed control range of 100:1 by an average of more than two times, and in the region of low speeds by more than ten times compared to the main algorithm currently in use, are proposed. This allows to consider a five-phase asynchronous electric drive as an alternative to a synchronous drive in the tasks of precision control of the movement coordinates. However, at a rotation frequency above half the nominal, resonant phenomena are observed, leading to torque ripples up to 30 %, which requires special measures and can completely exclude the possibility of using such a drive for a number of tasks.

Keywords: five-phase drive, modulation algorithm, torque pulsations, minimization of the torque pulsations

Acknowledgment: this research was supported by Priority 2030 Federal Academic Leadership Program.

For citation: Tomasov V. S., Usoltsev A. A., Vertegel D. A. Minimization of electromagnetic torque pulsations in a five-phase asynchronous electric drive. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 874—885 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-874-885.

Введение. Одной из важнейших задач при разработке прецизионного привода является минимизация пульсаций электромагнитного момента, так как от них в значительной степени зависит погрешность формирования заданных параметров движения. В связи с этим в последние десятилетия возник интерес к использованию в прецизионных приводах многофазных двигателей, так как сами двигатели, а также полупроводниковые преобразователи частоты, используемые в качестве источников питания в таких приводах, обладают рядом особенностей и преимуществ по сравнению с трехфазными.

В настоящее время пятифазные двигатели не выпускаются промышленностью серийно, и экспериментальные исследования встречаются крайне редко, так как они могут проводиться в основном на трехфазных двигателях с обмоткой статора, перемотанной на пять фаз. Поэтому подавляющее большинство исследований проводится на математических моделях, что ни в коей мере не снижает их ценности, так как многие явления в эксперименте могут искажаться или полностью перекрываться более выраженными явлениями, связанными с условиями эксперимента. В частности, это относится к пульсациям электромагнитного момента, непосредственное наблюдение которых крайне затруднено, так как требует использования широкополосных датчиков момента с низкими рабочими значениями частоты вращения.

Особенности электромагнитных процессов в пятифазном двигателе. Описание электромагнитных и электромеханических процессов в многофазных машинах и приводах основано на двух возможных представлениях многофазных систем: в многомерном пространстве и в пространстве симметричных составляющих. В первом случае все величины представляются векторами в базисе, имеющем размерность, равную числу фаз двигателя [1—5]. Такое представление чрезвычайно сложно и практически не используется в задачах привода.

Второе представление основано на методе симметричных составляющих, при котором полигармонические токи, напряжения, ЭДС и потокосцепления методом Фортезкью (*Fortescue C.L.*) раскладывают на отдельные гармоники, представляемые векторами на множестве плоскостей комплексных чисел. Это позволяет не только детально анализировать процессы в многофазных приводах, но и оптимизировать их работу, поскольку большинство современных систем управления строится на основе векторного описания электрических машин и алгоритмов работы инверторов [6—9].

Линейное преобразование вектора какой-либо величины, представленной в пятифазной системе координат, в ортогональную, называемое преобразованием Кларк (*Clarke*), порождает два ортогональных двумерных подпространства и одно одномерное [7, 8]. Одномерное, или скалярное, подпространство соответствует симметричной составляющей нулевой последовательности в исходных данных, а ортогональные — всем остальным. При этом симметричные составляющие с прямым и обратным порядком чередования фаз отображаются одним ортогональным подпространством, а составляющие с перемежающимся порядком чередования фаз — другим. Так как двумерное ортогональное подпространство можно представить плоскостью и таких подпространств два, то принято считать, что пятифазные величины отображаются векторами на двух плоскостях и скалярной величиной, соответствующей составляющей нулевой последовательности. Последняя при анализе электромагнитных процессов учитывается особо, так же как в трехфазных двигателях.

В пятифазном двигателе рабочими, или моментобразующими, являются только симметричные составляющие прямой и обратной последовательности, т.е. составляющие, отображаемые на главной 1-й плоскости. Составляющие с перемежающимся порядком

чередования фаз отображаются на 2-й плоскости и при условии электромагнитной симметрии и синусоидального распределения ЭДС вращения не участвуют в электромеханическом преобразовании энергии. Таким образом, высшие гармоники тока фазных обмоток, соответствующие 2-й плоскости, приводят только к формированию потоков рассеяния и увеличению потерь мощности в двигателе, причем величина этих токов может быть весьма значительной, так как они ограничиваются только активным сопротивлением обмотки статора и индуктивным сопротивлением потока рассеяния.

Отсутствие главной индуктивности потокоцеплений статора и ротора на 2-й плоскости следует из схемы магнитных потоков и соответствующих индуктивностей, например, для 1-й обмотки статора симметричной m -фазной машины, показанных графами на рис. 1.

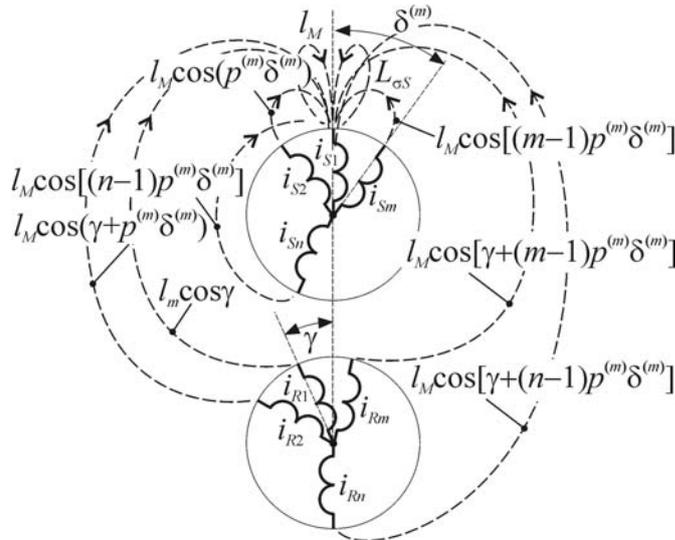


Рис. 1

Если ток n -й обмотки статора равен:

$$i_{nS} = \hat{i}_S \cos[\omega t - (n-1)q^{(m)}\delta^{(m)}] = \frac{\hat{i}_S}{2} \left\{ \begin{aligned} &\exp(j\omega t) \cdot \exp[-j(n-1)q^{(m)}\delta^{(m)}] + \\ &+ \exp(-j\omega t) \cdot \exp[j(n-1)q^{(m)}\delta^{(m)}] \end{aligned} \right\}, \tag{1}$$

где $n \in \{1, 2, K, \dots, m\}$ — порядковый номер фазы, \hat{i}_S — амплитуда тока; $\delta^{(m)} = 2\pi / m$ — характеристический угол m -фазной системы; $q^{(m)} \in \{1, 2, K, \dots, m\}$ — кратность характеристического угла, определяющая фазовое смещение и соответственно порядок чередования фаз во времени, то полное потокоцепление обмотки с магнитным полем статора с учетом коэффициентов взаимоиנדукции, показанных на рис. 1, равно

$$\begin{aligned} \Psi_{1SS} &= L_{\sigma S} i_{1S} + l_M \sum_{n=1}^m i_{nS} \cos[(n-1)p^{(m)}\delta^{(m)}] = \\ &= L_{\sigma S} i_{1S} + l_M \hat{i}_S [\exp(j\omega t) \cdot \Sigma_+ + \exp(-j\omega t) \cdot \Sigma_-] / 2 = \\ &= L_{\sigma S} i_{1S} + L_M \hat{i}_S \cdot \begin{cases} [\exp(j\omega t) + \exp(-j\omega t)] / 2 \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)} \\ 0 \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)} \end{cases} = \\ &= L_{\sigma S} i_{1S} + L_M \begin{cases} i_{1S} \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)} \\ 0 \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)} \end{cases} = \begin{cases} L_S i_{1S} \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ L_{\sigma S} i_{1S} \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)}, \end{cases} \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$\Sigma_+ = \sum_{n=1}^m \exp[-j(n-1)(p^{(m)} - q^{(m)})\delta^{(m)}] = \begin{cases} m \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ 0 \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)}, \end{cases}$$

$$\Sigma_- = \sum_{n=1}^m \exp[j(n-1)(p^{(m)} + q^{(m)})\delta^{(m)}] = \begin{cases} m \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ 0 \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)}, \end{cases}$$

$L_{\sigma S}$ — индуктивность рассеяния обмотки статора; $L_M = m \cdot l_M / 2$ — полная взаимная индуктивность; $L_S = L_{\sigma S} + L_M$ — полная индуктивность фазной обмотки статора; $p^{(m)} \in \{1, 2, K, \dots, m\}$ — кратность характеристического угла, определяющая порядок расположения осей обмоток по расточке статора.

С учетом пространственной и фазовой симметрии аналогичные выражения можно получить для всех остальных фазных обмоток. Тогда вектор потокосцепления обмотки статора с собственным магнитным полем составит

$$\Psi_{SS} = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^m \Psi_{nSS} \mathbf{a}_m^{n-1} = \begin{cases} L_S \mathbf{i}_S \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ L_{\sigma S} \mathbf{i}_S \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\mathbf{i}_S = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^m i_{nS} \mathbf{a}_m^{n-1}$ — обобщенный вектор тока статора; $\mathbf{a}_m = 1 \cdot \exp(jp^{(m)}\delta^{(m)})$ — базис m -фазной системы координат.

В предположении фазных токов ротора равными

$$i_{nR} = \hat{i}_R \cos[\omega t - (n-1)q^{(m)}\delta^{(m)} + \beta] =$$

$$= \frac{\hat{i}_R}{2} \left\{ \exp(j\omega t) \cdot \exp\{-j[(n-1)q^{(m)}\delta^{(m)} + \beta]\} + \right. \quad (4)$$

$$\left. + \exp(-j\omega t) \cdot \exp\{j[(n-1)q^{(m)}\delta^{(m)} - \beta]\} \right\}$$

потокосцепление 1-й обмотки статора с магнитным полем обмоток ротора с учетом их смещения на угол γ равно

$$\Psi_{1R} = l_M \sum_{n=1}^m i_{nR} \cos[(n-1)p^{(m)}\delta^{(m)} + \gamma] =$$

$$= L_M \hat{i}_R \cdot \begin{cases} \cos(\omega t \pm \beta + \gamma) \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ 0 \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)}. \end{cases} \quad (5)$$

Отсюда вектор потокосцепления обмотки статора с полем ротора

$$\Psi_{SR} = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^m \Psi_{nR} \mathbf{a}_m^{n-1} = \begin{cases} L_M \mathbf{i}_R e^{j\gamma} \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ 0 \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)} \end{cases} \quad (6)$$

и полное потокосцепление обмотки статора

$$\Psi_S = \Psi_{SS} + \Psi_{SR} = \begin{cases} L_S \mathbf{i}_S + L_M \hat{i}_R e^{j\gamma} \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ L_{\sigma S} \mathbf{i}_S \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)}. \end{cases} \quad (7)$$

Учитывая, что для обмоток ротора смещение обмоток статора в пространстве составляет $-\gamma$, можно по аналогии записать уравнение потокосцепления ротора в виде:

$$\Psi_R = \Psi_{RR} + \Psi_{RS} = \begin{cases} L_R \mathbf{i}_R + L_M \mathbf{i}_S e^{-j\gamma} \leftarrow p^{(m)} = \pm q^{(m)}, \\ L_{\sigma R} \mathbf{i}_R \leftarrow p^{(m)} \neq \pm q^{(m)}, \end{cases} \quad (8)$$

где $L_{\sigma R}$ — индуктивность рассеяния обмотки ротора; $L_R = L_{\sigma R} + L_M$ — полная индуктивность фазной обмотки ротора.

Таким образом, несоответствие порядка чередования фаз тока и последовательности расположения обмоток в пространстве исключает взаимоиндукцию статора и ротора, уменьшая полные индуктивности L_S и L_R до индуктивностей рассеяния $L_{\sigma S}$ и $L_{\sigma R}$, что приводит к многократному увеличению тока. В пятифазном двигателе это проявляется на 2-й плоскости, что требует принятия мер, ограничивающих, а в идеальном случае — полностью подавляющих напряжение. В противном случае паразитные токи могут значительно превышать рабочие.

Особенности работы двухуровневого пятифазного инвертора напряжения.

Пятифазный инвертор напряжения (ИН) при различных состояниях ключей полумостов формирует на выходе фазные напряжения с тремя ненулевыми значениями и одним нулевым. По отношению к напряжению в звене постоянного тока U_{dc} ненулевые напряжения составляют $0,247U_{dc}$, $0,4U_{dc}$ и $0,647U_{dc}$. Таким образом, в результате коммутации двухуровневый ИН становится виртуальным четырехуровневым. Эта особенность пятифазного ИН привлекает внимание разработчиков приводов, так как обеспечивает амплитудную модуляцию выходного напряжения в дополнение к широтно-импульсной и, следовательно, более эффективное использование преобразователя.

Выходные напряжения, соответствующие любым состояниям полумостов ИН, можно представить обобщенными векторами, называемыми базовыми векторами (БВ). Число таких векторов, с учетом ограничения на коммутационные функции, исключающего одинаковые состояния ключей полумоста, составляет 30 ненулевых и два нулевых вектора.

Базовые векторы, формируемые на 1-й плоскости, в соответствии с преобразованием Кларк одновременно формируются и на второй, т.е. можно сказать, что векторы 1-й плоскости отображаются на 2-й. На рис. 2, а представлено это отображение для всей плоскости БВ, а на рис. 2, б отдельно для базового сектора (БС).

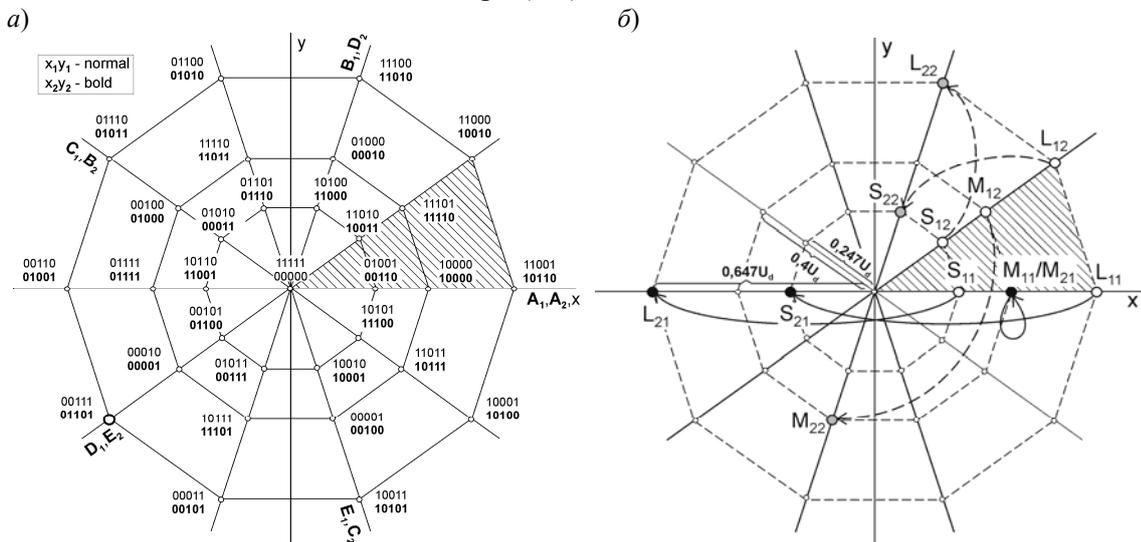


Рис. 2

При этом наблюдаются следующие закономерности отображения:

— векторы внешнего десятиугольника отображаются на внутреннем десятиугольнике ($L_{11} \rightarrow S_{21}$; $L_{12} \rightarrow S_{22}$), а векторы внутреннего десятиугольника на внешнем ($S_{11} \rightarrow L_{21}$; $S_{12} \rightarrow L_{22}$);*

* Здесь и далее в обозначении векторов первый элемент индекса соответствует номеру плоскости, а второй — номеру БВ в десятиугольнике.

— векторы среднего десятиугольника отображаются на среднем десятиугольнике ($\mathbf{M}_{11} \rightarrow \mathbf{M}_{21}$; $\mathbf{M}_{12} \rightarrow \mathbf{M}_{22}$), но меняют свое положение, за исключением векторов, расположенных на оси x (\mathbf{M}_{11} и \mathbf{M}_{16});

— совокупность граничных векторов сектора 1-й плоскости отображается на общей большой диагонали десятиугольников 2-й плоскости так, что средний БВ оказывается смещенным на угол π по отношению к большому и малому вектору.

Последняя особенность отображения позволяет компенсировать в среднем напряжения больших и малых БВ 2-й плоскости (\mathbf{L}_{2n} и \mathbf{S}_{2n}) средними БВ (\mathbf{M}_{2n}), если при формировании векторов 1-й плоскости выполнить условия

$$|\mathbf{S}_{2n}| \tau_{L_1} = |\mathbf{M}_{2n}| \tau_{M_1} \leftrightarrow \frac{\tau_{L_1}}{\tau_{M_1}} = \frac{|\mathbf{M}_{2n}|}{|\mathbf{S}_{2n}|} = \frac{0,4}{0,247} = 1,618 \leftrightarrow \tau_{L_1} = 1,618 \tau_{M_1} \quad (9)$$

$$|\mathbf{L}_{2n}| \tau_{S_1} = |\mathbf{M}_{2n}| \tau_{M_1} \leftrightarrow \frac{\tau_{M_1}}{\tau_{S_1}} = \frac{|\mathbf{L}_{2n}|}{|\mathbf{M}_{2n}|} = \frac{0,647}{0,4} = 1,618 \leftrightarrow \tau_{M_1} = 1,618 \tau_{S_1} \quad (10)$$

где $\bar{U}_{L_2} = |\mathbf{L}_{2n}| \tau_{S_1}$, $\bar{U}_{M_2} = |\mathbf{M}_{2n}| \tau_{M_1}$, $\bar{U}_{S_2} = |\mathbf{S}_{2n}| \tau_{L_1}$ — средние значения напряжения на 2-й плоскости за период модуляции T_m , соответствующие длительности формирования больших, средних и малых БВ ($\mathbf{L}_{2n} \leftrightarrow \mathbf{S}_{1k}$, $\mathbf{M}_{2n} \leftrightarrow \mathbf{M}_{1k}$, $\mathbf{S}_{2n} \leftrightarrow \mathbf{L}_{1k}$) в течение $\tau_{S_1} = t_{S_1} / T_m$, $\tau_{M_1} = t_{M_1} / T_m$, $\tau_{L_1} = t_{L_1} / T_m$ соответственно.

Таким образом, подавление напряжения на 2-й плоскости возможно только с помощью алгоритмов коммутации, формирующих на каждом периоде модуляции пары БВ $\mathbf{L}_{1n} + \mathbf{M}_{1n}$ и/или $\mathbf{S}_{1n} + \mathbf{M}_{1n}$ с длительностями, соответствующими соотношениям (9) и (10). При этом каждая пара БВ образует ненулевой виртуальный БВ (ВБВ). Поэтому общее число БВ сокращается с 32 до 22, а число уровней модуляции — с четырех до трех.

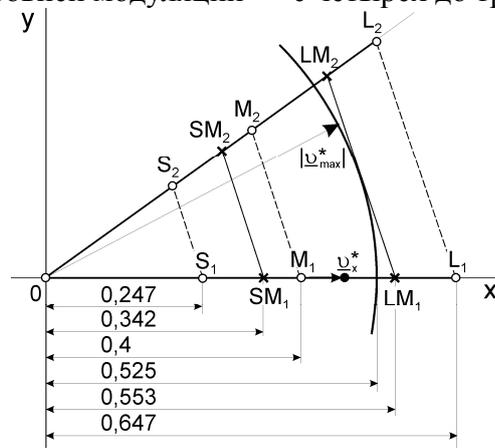


Рис. 3

Найдем модули ВБВ. Для этого расположим вектор заданного напряжения $\mathbf{v}_x^* = U^* / U_d$, где на оси x плоскости БВ (рис. 3). Модуль заданного напряжения максимален при отсутствии в алгоритме модуляции нулевого БВ, тогда

$$\tau_{M_1} + \tau_{L_1} = 1 \quad (11)$$

и

$$\mathbf{v}_x^* = \mathbf{v}_{x \max}^* = |\mathbf{M}| \tau_{M_1} + |\mathbf{L}| \tau_{L_1} \quad (12)$$

Исключив τ_{L_1} из (11) и (12), получим с учетом (10):

$$\tau_{M_1} (1 + 1,618) = 1 \rightarrow \tau_{M_1} = 1 / 2,618, \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_{x\max 1}^* = \tau_{M_1} (|\mathbf{M}| + |\mathbf{L}| \cdot 1,618) = |\mathbf{LM}_{\max}| = 0,553. \tag{14}$$

Расположим теперь вектор задания \mathbf{v}_x^* между малым и средним БВ. Тогда

$$\mathbf{v}_x^* = \mathbf{v}_{x\max 2}^* = |\mathbf{M}| \tau_{M_1} + |\mathbf{S}| \tau_{S_1}, \tag{15}$$

а с учетом (9):

$$\tau_{M_1} + \tau_{S_1} = 1 \rightarrow \tau_{S_1} (1 + 1,618) = 1 \rightarrow \tau_{S_1} = 1/2,618, \tag{16}$$

$$\mathbf{v}_{x\max 2}^* = \tau_{S_1} (|\mathbf{M}| \cdot 1,618 + |\mathbf{S}|) = |\mathbf{SM}_{\max}| = 0,342. \tag{17}$$

Таким образом, модули большого и малого ВБВ составляют $0,553U_d$ и $0,342U_d$ соответственно, а максимальный модуль вектора задания в линейной области регулирования напряжения, т.е. радиус окружности, вписанной в большой десятиугольник ВБВ, равен

$$|\mathbf{v}_{\max}^*| = |\mathbf{v}_{x\max 1}^*| \cos(\pi/10) = 0,525. \tag{18}$$

Следует заметить, что необходимость подавления напряжения на 2-й плоскости путем парного формирования БВ не только уменьшает число уровней модуляции и область линейного регулирования напряжения, но также вдвое увеличивает плотность коммутации, если в алгоритме используются только ненулевые БВ, и в 1,66 раза — если нулевой.

Алгоритмы модуляции с подавлением напряжения второй плоскости. Существует несколько способов модуляции, обеспечивающих подавление напряжения на 2-й плоскости. Наиболее известным является способ, обозначаемый в литературе как (2L+2M), или 2L2M [5, 9], т.е. модуляция с использованием двух больших (2L[arge]), двух средних (2M[iddle]) и нулевого вектора (на рис. 3 векторы \mathbf{LM}_1 , \mathbf{LM}_2 и 0). В результате модуляция фактически становится двухуровневой.

Длительность формирования БВ в БС определяется выражениями:

$$\tau_{LM_1} = \frac{|\mathbf{v}^*| \sin(\pi/5 - \vartheta^*)}{|\mathbf{LM}_{\max}| \sin(\pi/5)}; \tau_{LM_2} = \frac{|\mathbf{v}^*| \sin(\vartheta^*)}{|\mathbf{LM}_{\max}| \sin(\pi/5)}; \tau_0 = 1 - \tau_{LM_1} - \tau_{LM_2}; \tag{19}$$

$$\tau_{L_1} = k_L \tau_{LM_1}; \tau_{M_1} = k_M \tau_{LM_1}; \tau_{L_2} = k_L \tau_{LM_2}; \tau_{M_2} = k_M \tau_{LM_2},$$

где $\mathbf{v}^* = |\mathbf{v}^*| \exp(j\vartheta^*)$ — нормированный вектор заданного выходного напряжения инвертора; $k_L = 2 \cos(\pi/5) - 1 = 2 \cos(2\pi/5) = 0,618$; $k_M = 1 - k_L = 0,382$ — коэффициенты соотношения модулей большого и малого БВ, обеспечивающие подавление напряжения на 2-й плоскости.

На рис. 4, а показаны коммутационные функции фазных полумостов (а—е) [9, 10]. Они построены из условия минимизации плотности коммутации при двусторонней модуляции, т.е. с использованием симметричного двустороннего сигнала развертки. Такое решение оптимизирует спектр выходного напряжения инвертора.

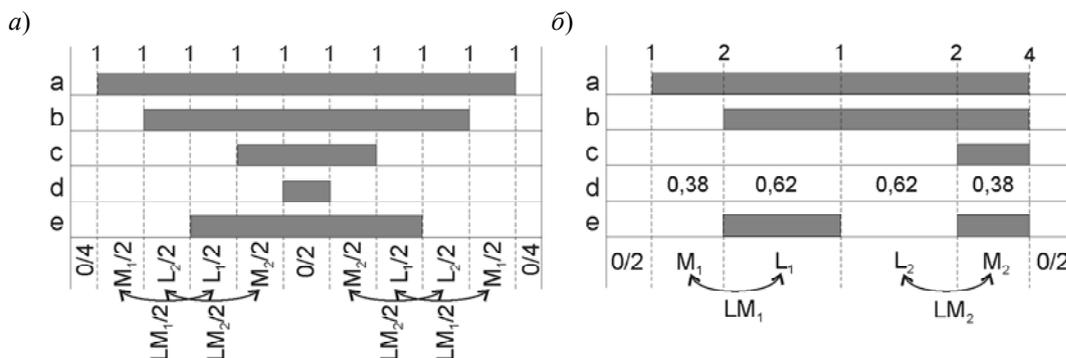


Рис. 4

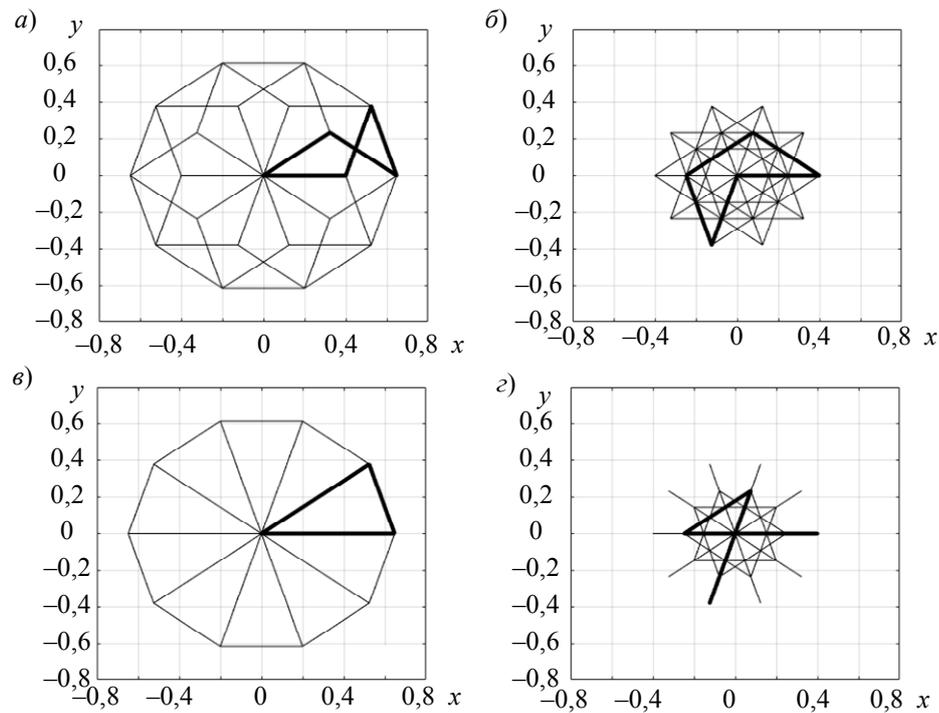


Рис. 5

Подавление напряжения на 2-й плоскости возможно также на основе того, что два больших БВ на границах сектора и два соседних больших БВ по обе стороны сектора отражаются на второй плоскости так, что один из четырех малых БВ оказывается в противоположной полуплоскости. Это позволяет создать алгоритм без использования средних и/или малых БВ. Однако пульсации напряжения и тока в таком алгоритме при прочих равных условиях существенно выше [10], поэтому в практике построения прецизионных электроприводов этот алгоритм не рассматривается.

Другой задачей, обычно рассматриваемой при построении алгоритма модуляции, является минимизация коммутационных потерь в ИН [11, 12]. При этом обычно минимизируется и мощность высших гармоник в выходном спектре.

Известно, что пульсации электромагнитного момента определяются не только амплитудной пульсацией тока и потокосцепления статора, но также фазовой пульсацией этих величин, т.е. траекторией их годографов в межкоммутационных интервалах [13—16]. Оптимальные годографы не должны содержать участки со встречным направлением движения. Это в значительной степени обеспечивается годографом напряжения с монотонной траекторией на моментобразующей плоскости.

На рис. 5, а показан годограф, соответствующий алгоритму рис. 4, а. Здесь представлены участки со встречным направлением вращения по отношению к вектору задания ($L_2/2 \rightarrow L_1/2$ и $M_2/2 \rightarrow L_1/2$), образующие перекрестную траекторию годографа.

Монотонную траекторию годографа (рис. 5, в) можно создать, совместив в соседних межкоммутационных интервалах односторонние ненулевые БВ сектора, как это показано на рис. 4, б. При этом интервал нулевого вектора можно разделить на две равные части, чтобы переход в соседний сектор происходил через нулевой вектор. Такой тип модуляции реализуется односторонней разверткой. Обозначим его как модифицированный вариант модуляции 2L2Mm (рис. 5, в, з — для 1-й и 2-й плоскости соответственно). Он обладает такой же плотностью коммутации, как исходный вариант 2L2M — 10 коммутаций за период (рис. 5, а, б — для 1-й и 2-й плоскости соответственно), но вдвое большими межкоммутационными интервалами, поэтому для получения сопоставимых результатов при моделировании следует вдвое

увеличить частоту развертки, что приведет к удвоенной плотности коммутации и коммутационным потерям в инверторе.

Очевидно, что условия минимизации коммутационных потерь и минимизации пульсаций электромагнитного момента находятся в противоречии, так как возрастание длительности межкоммутационных интервалов и их числа сокращает потери, но увеличивает пульсации. Однако здесь можно достичь компромисса, если алгоритм модуляции позволяет существенно снизить пульсации момента при допустимых коммутационных потерях.

Моделирование пятифазного асинхронного привода. Для сравнения эффективности алгоритмов модуляции 2L2M и 2L2Mm был выполнен конструктивный перерасчет асинхронного трехфазного двигателя типа 5A160S2 и получены номинальные значения и параметры схемы замещения пятифазного прототипа, приведенные в таблице.

Двигатель	P , кВт	n , мин ⁻¹	КПД, %	$\cos\varphi$	I , А	M , Нм	k_{\max}	k_{st}	r_S , Ом	r_R , Ом	$L_{S\sigma} = L_{R\sigma}$, мГн	L_m , мГн
5A160S2	15,0	2920	90	0,89	28,5	49,0	3,0	2,2	0,553	0,219	1,37	66,3
Прототип	14,6	2856	87	0,89	16,0	48,7	3,4	2,9	0,921	0,664	1,64	111,2

Эффективность алгоритмов модуляции исследовалась при частотном управлении по закону $U/f = \text{const}$ с IR -компенсацией при номинальном моменте нагрузки в диапазоне частот основной гармоники напряжения от номинальной до 1 % от номинальной частоты, т.е. при индексе модуляции $mi = 0,01—1,0$. При этом IR -компенсация была настроена таким образом, чтобы при номинальной нагрузке двигатель работал с номинальным фазным током. Частота развертки в алгоритме 2L2M составляла 3 кГц, а в алгоритме 2L2Mm — 6 кГц, что необходимо для выравнивания средних межкоммутационных интервалов алгоритмов. Результаты моделирования нормированы номинальными значениями соответствующих величин.

На рис. 6 для этих условий показаны коэффициенты гармонических искажений THD напряжения (а) и тока (б). Как и следовало ожидать, искажение напряжения при односторонней модуляции несколько выше, чем при симметричной двусторонней, т.е. модифицированный алгоритм коммутации обладает худшим спектром напряжения. Однако спектр фазного тока у алгоритма 2L2Mm во всем диапазоне частот существенно лучше, искажения в среднем более чем в два раза ниже (6,83/3,38 %).

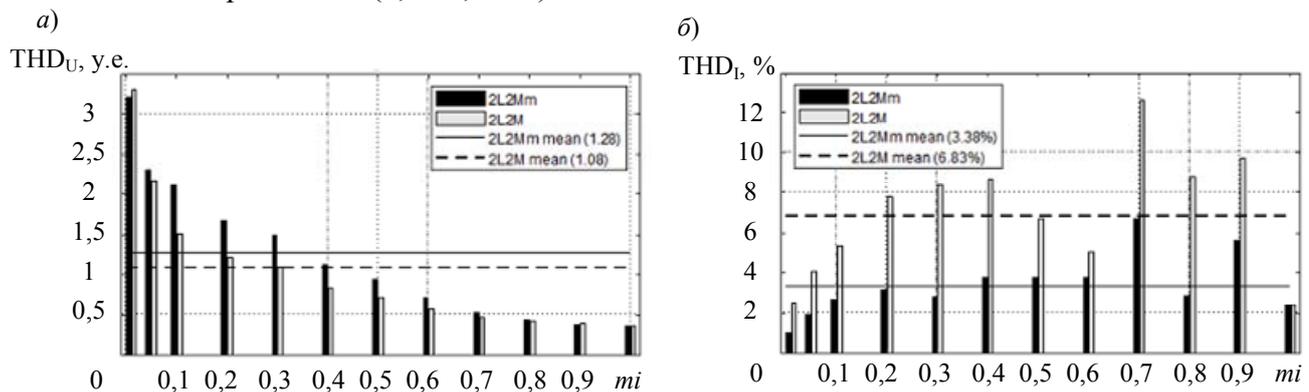


Рис. 6

В идеальном случае пульсации электромагнитного момента содержат три составляющие, связанные с: 1) формированием БВ в пределах периода развертки; 2) модуляцией межкоммутационных интервалов в пределах одного сектора плоскости БВ; 3) переходами между секторами.

На рис. 7 для алгоритма 2L2M показаны временные диаграммы пульсаций момента и низкочастотная часть спектра пульсаций, усредненных за период развертки, в статическом режиме работы привода при двух индексах модуляции 1,0 и 0,7. При номинальной частоте (рис. 7, а) основная мощность низкочастотного спектра пульсаций приходится на кратные

десяти гармоники, т.е. кратные числу секторов плоскости БВ. При этом максимальный размах пульсаций создают переходы между секторами, что связано с переходом к новому подмножеству БВ, формирующих выходное напряжение инвертора в новом секторе.

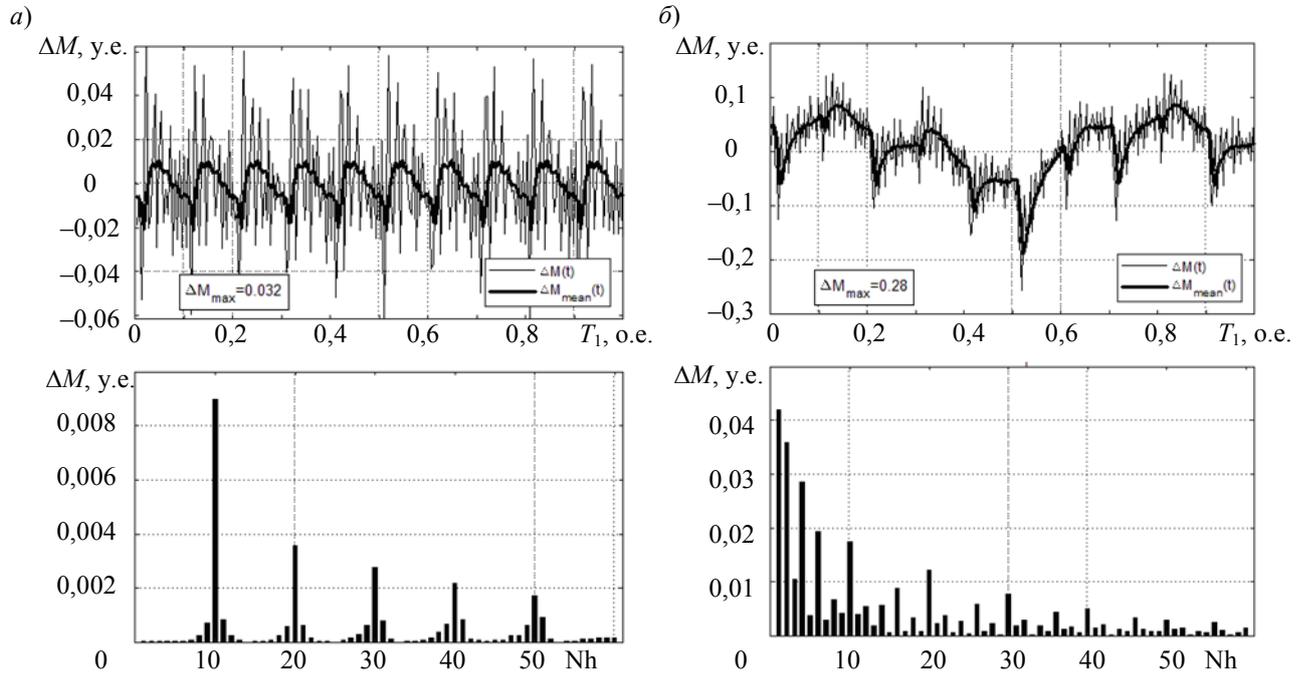


Рис. 7

Следует заметить, что асинхронный привод является сложной электромеханической системой высокого порядка. Импульсный характер питания двигателя на некоторых частотах основной гармоники вызывает низкочастотные резонансные явления, заметные в возмущениях коэффициента искажений тока на рис. 6. Однако еще более заметны эти явления в картине пульсаций электромагнитного момента на рис. 8, где также выделяются пульсации при коэффициентах модуляции 0,9 и 0,7 независимо от алгоритма модуляции. На рис. 7, б пульсации момента и их спектр для алгоритма 2L2M с индексом модуляции 0,7 показаны в деталях. Здесь видно, что в спектре преобладает основная гармоника, а также 2-я, 4-я и 6-я, отсутствующие при номинальной частоте. При этом в несколько раз увеличилась мощность гармоник, кратных десяти.

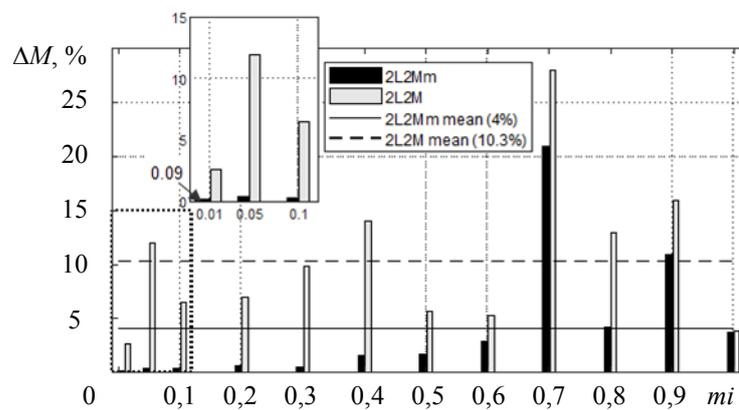


Рис. 8

В целом модифицированный алгоритм модуляции 2L2Mm более чем в два раза снижает уровень пульсаций электромагнитного момента, а в низкочастотной области ($mi < 0,5$) — в десять и более раз. Особенно это заметно при минимальном индексе модуляции $mi = 0,01$, когда пульсации снижаются почти в 30 раз (см. рис. 8) и достигают уровня, допускающего использование такого привода в прецизионных роботехнических комплексах.

Выводы:

1) для минимизации пульсаций электромагнитного момента алгоритм пространственно-векторной модуляции должен строиться с монотонной траекторией движения вектора выходного напряжения инвертора;

2) модификация по этому принципу основного известного алгоритма модуляции с использованием двух больших и двух средних базовых векторов приводит в диапазоне регулирования частоты вращения 100:1 к снижению пульсаций электромагнитного момента более чем в два раза в среднем и более чем в десять раз при малом значении частоты вращения;

3) снижение пульсаций электромагнитного момента при малых значениях частоты вращения до крайне низкого уровня (<0,1 %) позволяет рассматривать асинхронный пятифазный привод в качестве альтернативы синхронному приводу в задачах прецизионного регулирования координат движения;

4) нестабильность работы привода при частоте вращения выше половины номинальной приводит к пульсациям электромагнитного момента в 10—30 %, что требует детального исследования его работы в этих условиях и может полностью препятствовать его применению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Duran M. J., Levi E. Multi-dimensional approach to multi-phase space vector modulation // Proc. IEEE Annual Conf of the Industrial Electronics Society IECON. Paris, France, 2006. P. 2103—2108.
2. Duran M. J., Barrero F., Toral S., Levi E. Multi-dimensional space vector pulse width modulation scheme for five-phase series-connected two-motor drives // Proc. IEEE Intern. Electric Machines and Drives Conf. IEMDC. Antalya, Turkey, 2006.
3. Duran M. J., Toral S., Barrero F. Real-Time Implementation of Multi-Dimensional Five-Phase Space Vector PWM Using Look-Up Table Techniques // 33rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Taipei, Taiwan, 5—8 November 2007. P. 1518—1523.
4. López O., Dujic D., Jones M., Freijedo F. D., Doval-Gandoy J., Levi E. Multidimensional Two-Level Multiphase Space Vector PWM Algorithm and Its Comparison with Multifrequency Space Vector PWM Method // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58, N 2, February. P. 465—475.
5. Lega A., Mengoni M., Serra G., Tani A., Zarri L. General Theory of Space Vector Modulation for Five-Phase Inverters // 2008 IEEE Intern. Symp. on Industrial Electronics. Cambridge, UK, 30 June—2 July 2008. P. 237—244.
6. Barton T. H., Dunfield C. J. Poly-phase to two axis transformation for real windngs // IEEE Trans, Power App. Sys. 1968. Vol. PAS87, N 5. P. 1342—1346.
7. Paap G. C. Symmetrical Components in the Time Domain and Their Application to Power Network Calculations // IEEE Trans. on Power Sys. 2000. Vol. 15, N 2. P. 522—528.
8. Ryu H. M., Kim J. H., Sul S. K. Analysis of multi-phase space vector pulse width modulation based on multiple d-q spaces concept // IEEE Trans. on Power Electronics. 2005. Vol. 20, N 6. P. 1364—1371.
9. Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H. A., Williamson S. Multiphase induction motor drives—A technology status review // IET Elect. Power Appl. 2007. Vol. 1, N 4. P. 489—516.
10. Zulkifli M. S. B., Munim W. N. B. W. A., Haris H. C. M. Five Phase Space Vector Modulation Voltage Source Inverter Using Large Vector Only // Intern. Symp. on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE 2012). Kota, 3—4 December 2012. P. 1—5.
11. Dujic D., Jones M., Levi E., Prieto J., Barrero F. Switching Ripple Characteristics of Space Vector PWM Schemes for Five-Phase Two-Level Voltage Source Inverters—Part 1: Flux Harmonic Distortion Factors // IEEE Trans. Ind. Electronic. 2011. Vol. 58, N 7. July.
12. Iqbal A., Levi E. Space vector modulation schemes for a five-phase voltage source inverter. Dresden, EPE, 2005.
13. Tomasov V. S., Usoltsev A., Vertegel D., Szczepankowski P., Strzelecki R., Poliakov N. Optimized Space-Vector Modulation Schemes for Five-Phase Precision Low-Speed Drives with Minimizing the Stator Current Ripple // 14th Intern. Conf. on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. 2020. P. 279—284.

14. Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А., Денисов К. М. Исследование пульсаций электромагнитного момента в прецизионном сервоприводе при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 2(120). С. 359—368.
15. Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А. Особенности использования многоуровневых инверторов в системах прецизионного сервопривода // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1052—1059.
16. Tomasov V. S., Usoltcev A. A., Vertegel D. A., Strzelecki R. Space vector modulation in multilevel inverters of the servo drives of the trajectory measurements telescopes // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 7. С. 624—636.

Сведения об авторах

- Валентин Сергеевич Томасов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; профессор;
E-mail: tomasov@ets.ifmo.ru
- Александр Анатольевич Усольцев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент;
E-mail: uaa@ets.ifmo.ru
- Денис Александрович Вертегел** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: vertegeldenis@gmail.com

Поступила в редакцию 17.07.2022; одобрена после рецензирования 29.07.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. Duran M.J., Levi E. *Proc. IEEE Annual Conf of the Industrial Electronics Society IECON*, Paris, France, 2006, pp. 2103–2108.
2. Duran M.J., Barrero F., Toral S., Levi E. *Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. IEMDC*, Antalya, Turkey, 2006.
3. Duran M.J., Toral S., Barrero F. *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taipei, Taiwan, November 5–8, 2007, pp. 1518–1523.
4. López O., Dujic D., Jones M., Freijedo F.D., Doval-Gandoy J., Levi E. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, no. 2(58), pp. 465–475.
5. Lega A., Mengoni M., Serra G., Tani A., Zarri L. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 30 June–2 July 2008, Cambridge, UK, pp. 237–244.
6. Barton T.H., Dunfield C.J. *IEEE Trans. Power App. Sys.*, 1968, no. 5(PAS87), pp. 1342–1346.
7. Paap G.C. *IEEE Trans. on Power Sys.*, 2000, no. 2(15), pp. 522–528.
8. Ryu H.M., Kim J.H., Sul S.K. *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2005, no. 6(20), pp. 1364–1371.
9. Levi E., Bojoi R., Profumo F., Toliyat H.A., Williamson S. *IET Elect. Power Appl.*, 2007, no. 4(1), pp. 489–516.
10. Zulkifli M.S.B., Munim W.N.B.W.A., Haris H.C.M. *International Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE 2012)*, December 3–4, 2012, Kota, pp. 1–5.
11. Dujic D., Jones M., Levi E., Prieto J., Barrero F. *IEEE Trans. Ind. Electronic*, 2011, no. 7(58), July.
12. Iqbal A., Levi E. *Space vector modulation schemes for a five-phase voltage source inverter*, Dresden, EPE, 2005.
13. Tomasov V.S., Usoltsev A., Vertegel D., Szczepankowski P., Strzelecki R., Poliakov N. *14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering 2020*, 2020, pp. 279–284.
14. Tomasov V.S., Usoltcev A.A., Vertegel D.A., Denisov K.M. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, no. 2(19), pp. 359–368 (in Russ.)
15. Tomasov V.S., Usoltcev A.A., Vertegel D.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 12(61), pp. 1052–1059. (in Russ.)
16. Tomasov V.S., Usoltcev A.A., Vertegel D.A., Strzelecki R. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 7(60), pp. 624–636.

Data on authors

- Valentin S. Tomasov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: tomasov@ets.ifmo.ru
- Aleksander A. Usoltsev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: uaa@ets.ifmo.ru
- Valentin S. Tomasov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: vertegeldenis@gmail.com

Received 17.07.2022; approved after reviewing 29.07.2022; accepted for publication 31.10.2022.

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**
**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL ENVIRONMENT,
SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 921.01
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОС

Л. В. ЕФРЕМОВ^{*1}, А. В. ТИКАЛОВ²

¹ *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*

^{*} *levlefr@mail.ru*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. На основе расчетных и экспериментальных исследований рассмотрены и решены актуальные задачи выбора наиболее эффективных инструментов для определения износа материалов методом искусственных баз. Основное внимание уделено проблемам обеспечения точности, надежности и доступности инструментов с учетом требуемого диапазона линейного и объемного износа при использовании пар трения с постоянным и переменным удельным давлением.

Ключевые слова: *давление, диск, износ, износостойкость, материал, трибометр, образец, оценка, трение, хорда*

Ссылка для цитирования: *Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Современные способы испытаний материалов на износ // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 886—894. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894.*

MODERN METHODS OF TESTING MATERIALS FOR WEAR

L. V. Efremov^{*1}, A. V. Tikalov²

¹ *Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia*

^{*} *levlefr@mail.ru*

² *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

Abstract. On the basis of computational and experimental studies, topical problems of choosing the most effective tools for determining the wear of materials by the method of artificial bases are considered and solved. The main attention is paid to the problems of ensuring the accuracy, reliability and availability of tools, taking into account the required range of linear and volumetric wear when using friction pairs with constant and variable specific pressure.

Keywords: *pressure, disk, wear, wear resistance, material, tribometer, sample, evaluation, friction, chord*

For citation: *Efremov L. V., Tikalov A. V. Modern methods of testing materials for wear. Journal of Instrument Engineering. 2022. Vol. 65, N 12. P. 886—894 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894.*

Общие положения. Основной задачей настоящей работы является помощь исследователям в выборе наилучших инструментов для измерения износов образцов материалов методом искусственных баз (МИБ).

Возможности этого метода продемонстрируем на примере испытаний на трибометрах типа СМЦ-2 двух видов пар трения, применяемых при сравнительном тестировании материалов (рис. 1, а). Сначала подробно рассмотрим серийную колодку (см. рис. 1, б) с полным кон-

тактом округлых поверхностей трения колодки и диска, что приводит к работе при постоянном давлении. В этом варианте, который относится к стандартному методу измерений, искусственная база образуется специальным инструментом, выбор которого является одной из задач настоящего исследования. В этом случае для определения износа поверхности следует выполнять два измерения базы — до и после сеанса испытаний.

Второй вариант пары трения (рис. 1, в) используется в так называемом методе хорды „block-on-ring“ при переменном давлении [1, 2]. На первый взгляд, рассматриваемые варианты пар трения мало отличаются друг от друга. Однако использование образца исследуемого материала в виде плоского бруска (1, рис. 1, в) создает иные условия износа при испытаниях. В процессе испытаний диск 2 врезается в плоскую поверхность бруска 1, образуя износ в виде сегмента с хордой, длина которой изменяется от нуля до L . Поэтому износ измеряется один раз по окончании сеанса. Длина хорды L условно является искусственной базой, которую можно просто и точно оценивать любым мерительным инструментом. При этом она служит аргументом всех функций, входящих в упрощенный алгоритм расчета характеристик износа.

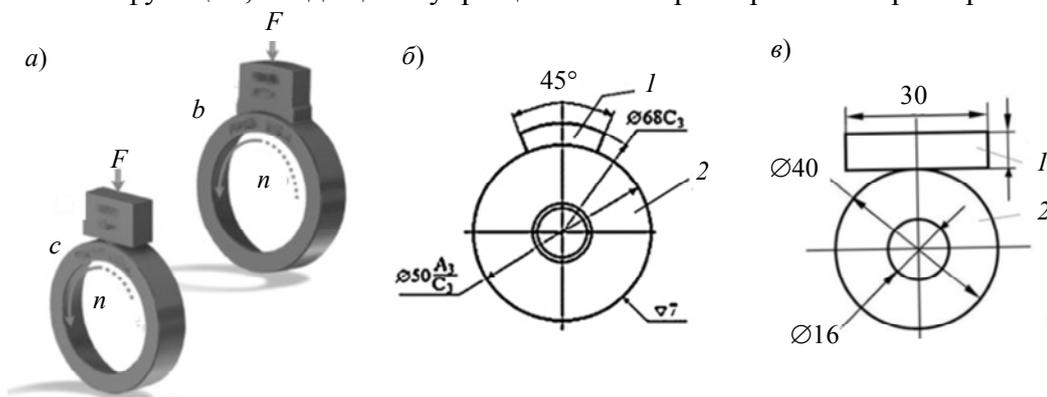


Рис. 1

Целью испытаний на износ материалов является оценка их линейной и (или) объемной износостойкости. Для этого при испытаниях любого из вариантов пар трения (см. рис. 1) должны быть определены или назначены следующие исходные данные:

— размеры: R — радиус диска 2 или кругового пути трения, мм; H_k — ширина колодки 1, мм; γ — плотность материала колодки, г/мм³;

— режим испытаний: n — частота вращения диска 2, об/мин; t — продолжительность сеанса испытаний, мин; F — нагрузка на образец 1, Н;

— результаты испытаний: l_0 и l_1 — размеры искусственной базы до и после сеанса испытания, мм; L — длина хорды, мм.

По данным испытаний материалов на износ рассчитываются удельное давление:

$$P = F/B; \quad (1)$$

объемная износостойкость

$$\varepsilon_W = 10^{-3} F S/W \quad (\text{Нм/мм}^3); \quad (2)$$

линейная

$$\varepsilon_L = S/h = 2\pi R n t/h = 1000 \varepsilon_W / P \quad (\text{мм/мм}). \quad (3)$$

При этом в числителе формул (1)—(3) расположены значения пути трения

$$S = 2\pi R n t \quad (\text{мм}) \quad (4)$$

и заданной нагрузки F , которые применяются для всех вариантов пар трения (см. рис. 1).

Входящие в знаменатель формул (1)—(3) величины — площадь пятна контакта B (мм²), линейный h (мм) и объемный износ W (мм³), а также массовый износ G (г) — определяются ниже с учетом особенностей пар трения.

Стандартный метод испытания серийной колодки. Рассмотрим проведение испытаний на износ серийной колодки типа 1 (см. рис. 1, б) с учетом МИБ. Метод основан на образовании специальных лунок с заданным сужающимся в глубину профилем, наносимых на исследуемую поверхность. Лунки могут иметь различную форму в зависимости от способа ее образования [3].

Первый способ заключается в получении отпечатка индентора шарообразной, пирамидальной или конической формы. Этот способ применять не рекомендуется ввиду неудобства использования для стационарных твердомеров по Виккерсу и Бринеллю, а также по причине повышения погрешности при вдавливании пирамидального, конического или шарового индентора из-за поднятия металла вокруг отпечатка и образования вокруг него „навалов“ (рис. 2).

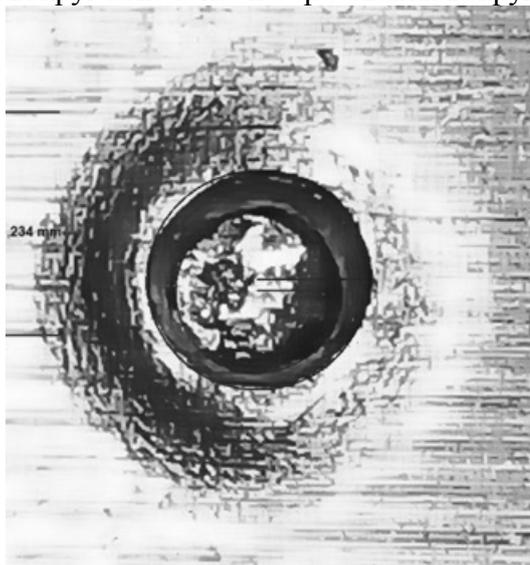


Рис. 2

Второй способ заключается в образовании лунки путем создания углубления различного профиля, когда металл удаляется путем резания с образованием стружки или врезания диска в плоский образец. Подобный способ и был назван методом искусственных баз (МИБ). Искусственной базой можно назвать внешнее изображение лунки на поверхности образца. Как показано на рис. 3, а, размер искусственной базы l_0 и l_1 , измеряемый с помощью оптического микроскопа, позволяет затем рассчитать значение глубины лунки до Δ_0 и после Δ_1 сеанса испытаний с целью оценки износа h за это время по соотношению

$$h = \Delta_0 - \Delta_1. \quad (5)$$

Описание МИБ приводится во многих публикациях о трении и износе. Однако конкретные данные об инструментах для нарезания лунок удалось найти в трудах создателей МИБ [3, 4], которые предложили только один вариант формы лунки в виде продолговатой щели с заостренными концами. Для этого были разработаны стандарты ГОСТ 23.301-78 и ГОСТ 27860-88, согласно которым указанные лунки образуются с помощью специального прибора алмазным резцом в форме трехгранной пирамиды (рис. 3, а). Резец вращается вокруг оси с радиусом траектории $r = 11$ мм, постепенно углубляясь в поверхность детали. После нескольких его оборотов образуется лунка первичной длиной l_0 и глубиной Δ_0 . В результате сеанса испытаний база уменьшается до величины l_1 , которая соответствуют глубине Δ_1 и износу h по формуле

$$\Delta = \frac{l^2}{8r}. \quad (6)$$

Как указано в стандарте, необходимым элементом прибора является микроскоп с линейным увеличением не менее 3,7 крат. Такой прибор приобрести сейчас невозможно, а его изготовление требует больших средств и времени. Не меньше проблем возникает с технологией нарезания лунки при постоянном контроле процесса с помощью микроскопа. Вследст-

вие повышения концентрации напряжений по причине заостренной формы величина лунки не должна превышать 4 мм. Как будет показано далее, это отрицательно отразится на диапазоне значений износа.

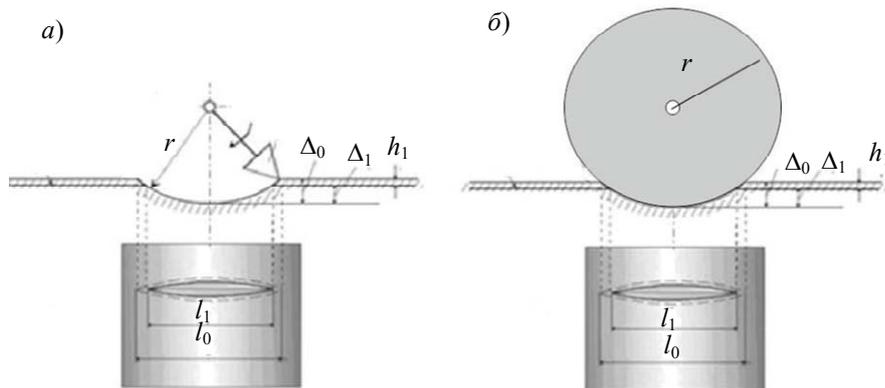


Рис. 3

В работе [4] глубину лунки за время испытаний плоских поверхностей, а также цилиндрических поверхностей при расположении лунки поперек образующей цилиндра вычисляют по приближенной формуле (6), а износ — по (5).

Отмеченные недостатки исходного варианта МИБ позволяют поставить и решить задачу усовершенствования этого метода путем разработки более простых, экономичных, точных и надежных инструментов для определения как линейной, так и объемной износостойкости материалов.

Как показано на рис. 4, в состав лабораторного оборудования следует включить электронный цифровой микроскоп 1 с увеличением 50—500 крат в сочетании с ноутбуком 3. Программное обеспечение микроскопа должно включать программу распознавания образов для измерения фотографий искусственных баз любой формы 4 на поверхности образца 2, в том числе окружность.



Рис. 4

Разработка эффективных инструментов для МИБ. Главной задачей следует считать обоснование новых инструментов для точного нарезания лунок с помощью сверлильного станка за счет строго вертикального перемещения инструмента [5].

С этой целью выполнены пробные образования баз различными способами (рис. 5): *а* — ударным вдавливанием шарика, *б* — высверливанием сверлом при $\varphi = 118^\circ$, *в* — выскабливанием сверлом для керамики, *г* — фрезерованием шарообразной минифрезой, *д* — надрезом миниболгаркой радиусом $r = 12$ мм и др. [6].

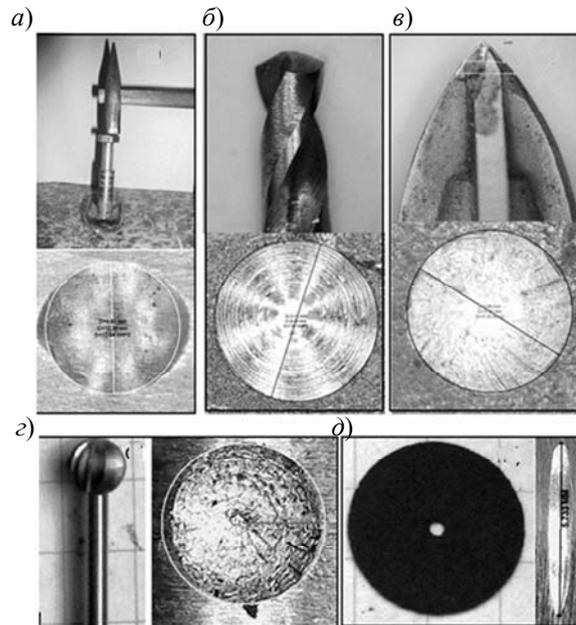


Рис. 5

Анализ результатов эксперимента [5] позволил в качестве основного рабочего инструмента выбрать обычное сверло по ГОСТ 10902-77 с углом заточки 118° (рис. 6, а). Высокое качество и точность образования первичной круглой лунки диаметром до 4 мм обеспечиваются за счет фабричного изготовления и использования только режущей части сверла (рис. 6, б).

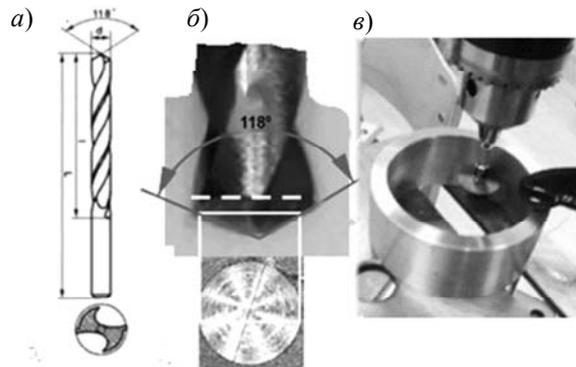


Рис. 6

На основании геометрических соображений доказана функция глубины Δ от диаметра лунки $d = l$:

$$\Delta = \frac{d}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{d}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{118^\circ}{2}\right)} = 0,3 d . \quad (7)$$

Это значит, что при диаметре $d = 4$ мм получаем ее максимально приемлемую глубину около $\Delta = 1,2$ мм.

Вторым рабочим инструментом выбрана миниболгарка радиусом $r = 12$ мм из ювелирного набора инструментов. Она позволяет за счет быстрого касания этого инструмента поверхности при вращении на сверлильном станке получить такую же по форме и размерам лунку (рис. 6, в), которая образуется прибором по ГОСТ 23.301-78 (рис. 2, б). Однако этот способ несоизмеримо проще, надежнее и экономичнее. Общим недостатком образования щелеобразной лунки является ее малая глубина. При $l_0 = 4$ мм и $l_1 = 0$ по формуле (6) получаем $\Delta = P/(8r) = 4^2/(8 \cdot 12) = 0,167$ мм, что не всегда допустимо, по сравнению, например, со сверлом, у которого $\Delta = 1,2$ мм.

Здесь уместно привести доказательство происхождения простой формулы (7) для оценки глубины лунки Δ путем разложения в ряд Тейлора точного геометрического выражения:

$$\Delta = r \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2r} \right)^2} \right) \text{series, } l, 6 \Rightarrow \frac{l^2}{8r} + \frac{l^4}{128r^3} + \dots \approx \frac{l^2}{8r}. \quad (8)$$

Видно, что формула (7) является первым членом этого ряда [7]. Это обеспечивает малую погрешность упрощенного алгоритма расчета. Программой MATHCAD установлено, что при $l = 4$ мм она составляет меньше одного процента: погрешность $\rho = (\Delta_1 - \Delta) / \Delta_1 = (0,168 - 0,167) / 0,168 = 0,7$ %.

Важно отметить, что точность нарезания исходной лунки длиной l_0 или диаметром d_0 не имеет принципиального значения, потому что износ рассматривается как разница глубин $h = \Delta_0 - \Delta_1$ по (6).

Алгоритмы оценки износа серийной колодки. Изучение линейного износа МИБ серийного образца типа рис. 1, б целесообразно завершить методикой расчетной оценки его объемного W и массового G износа [8].

Для решения этой задачи с погрешностью не более 2 % при износе менее 1 мм использовали следующие данные: радиус диска $r = 25$ мм, ширина колодки $H_k = 10$ мм, угол колодки $\varphi = 45^\circ$, плотность материала (сталь) $\gamma = 0,0075$ г/мм³. Линейный износ h при $l_1 = 0$ и $l_0 = 4$ мм определен по формуле (7) для миниболгарки и по формуле (8) — для сверла.

$$L \approx \frac{\varphi}{180} \pi R = 0,25 \pi R; \quad (9)$$

$$B = L H_k; \quad (10)$$

$$W = B h; \quad (11)$$

$$G = W \gamma. \quad (12)$$

Условная хорда (точнее, длина контакта) L рассчитана по формуле (9), площадь пятна контакта B — по формуле (10), объемный износ W — по формуле (11) и массовый износ G — по формуле (12).

Алгоритмы оценки износа методом хорды „block-on-ring“ [1, 2]. Как было отмечено ранее, при испытаниях прямоугольных колодок (рис. 1, в) исходным показателем является не износ, а размер хорды L лунки в виде сегмента, который обычно находится в пределах от 0,5 до 12—14 мм. Увеличение хорды связано с уменьшением твердости материала или возрастанием шероховатости контртела (поверхности диска). В работах [7, 8] показано упрощение алгоритмов оценки объемного и линейного износа от хорды. На основании разложения точных геометрических выражений в ряд Тейлора удалось доказать, что с погрешностью до 2 % для расчета этих показателей можно применить простейшие функции $W = L^3/12r$ и $h = L^2/12r$. Подобный прием был применен при доказательстве МИБ (8) для лунки типа рис. 3, а по ГОСТ 23.301-78.

На рис. 7 выполнен корреляционный анализ зависимости погрешности расчета σ линейного износа h (кривая 1) и площади пятна контакта B (2) от хорды L . Это позволило решить обратную задачу обоснования для B и h точных функций.

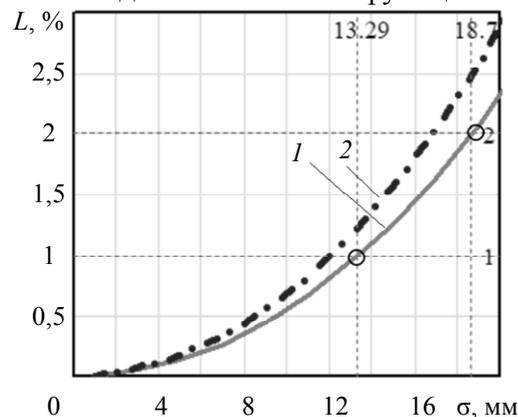


Рис. 7

Оценка объемного W и массового износа G выполняется по указанным ранее формулам.

Завершающим этапом испытаний материалов на износ всех пар трения является расчет объемной ε_W и линейной ε_L износостойкости по формулам (2) и (3) с последующей оценкой по ГОСТ 23.001-2004*:

$$B = \left(1 + L^{2,03} / 1,53 \cdot 10^4\right) L H_k, \quad (13)$$

$$h = \left(1 + L^{2,03} / 1,91 \cdot 10^4\right) L^2 / 12r. \quad (14)$$

Варианты выбора пар трения и инструментов для измерения износов. Для обоснования рекомендаций по выбору оптимальных планов испытаний образцов материалов на износ рассмотрим особенности типов пар трения и инструментов с учетом оценки параметров при одинаковом износе $h = 0,167$ мм (табл. 1) и зависимости линейного h и массового G износа от размера искусственной базы для используемых инструментов (табл. 2).

Таблица 1

Расчет износостойкости пар трения при линейном износе $h = 0,167$ мм

Пара трения	B , мм ²	W , мм ³	P , МПа	S , мм	ε_W , Нм/мм ³	ε_L , мм/мм	G , г
Рис. 1, б	196,35	29,45	1,02	$1,41 \cdot 10^6$	$9,6 \cdot 10^3$	$9,42 \cdot 10^6$	0,245
Рис. 1, в	70,6	11,8	2,82	$1,41 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^4$	$9,42 \cdot 10^6$	0,089

Приведенные в этих таблицах результаты получены при следующих исходных данных:

- размеры пары трения: $R = 25$ мм; $H_k = 10$ мм; $\gamma = 0,0075$ г/мм³;
- режим испытаний: $n = 100$ об/мин, $t = 30$ мин, $F = 200$ Н;
- результаты измерений: болгаркой — $r = 12$ мм, $l_0 = 4$ мм, $l_1 = 0$, $\Delta_0 = 12/8r = 0,167$ мм; сверлом — $d_0 = 4$ мм, $d_1 = 0$, $\Delta_0 = 0,3d_0 = 1,2$ мм, $\Delta_1 = 0$, $h = \Delta_0 - \Delta_1 = 1,2$ мм; методом хорды — $L = \sqrt{12hR} = 7,08$ мм.

Таблица 2

Зависимость линейного и массового износа от метода образования баз

„block-on-ring“			Болгарка			Сверло		
L , мм	h , мм	G , г	l , мм	h , мм	G , г	d , мм	h , мм	G , г
1	0,003	0	0,5	0,003	0,004	0,555	0,167	0,245
2	0,013	0,002	1	0,01	0,015	1	0,3	0,442
4	0,053	0,016	2	0,042	0,061	2	0,6	0,884
7,08	0,167	0,089	3	0,094	0,138	3	0,9	1,325
20	1,333	2	4	0,167	0,245	4	1,2	1,767

Путь трения S рассчитан по формуле (4), площадь пятна контакта B , объемный W и массовой износ G для серийной пары трения типа рис. 1, б — по (9)—(12). Для метода „block-on-ring“ по результатам измерений хорды L вычисляются площадь пятна контакта B и линейный износ h по формулам (13) и (14). Таким образом, получены все данные, позволяющие определить удельное давление P , объемную ε_W и линейную ε_L износостойкость по (2) и (3) [8].

Выводы и рекомендации. Приведенные результаты позволяют сформировать основные выводы и рекомендации по выбору рациональных средств измерения износов материалов.

Прежде всего следует отметить явное преимущество метода хорды „block-on-ring“ типа рис. 1, в, по сравнению с серийной колодкой типа рис. 1, б. Пара трения метода хорды в виде прямоугольного бруска имеет низкую стоимость и проста в изготовлении. Метод не требует нарезания лунок, которые образуются автоматически с высокой точностью при врезании диска в плоскую поверхность бруска, позволяющей оценивать объемный и массовый износ по данным о хорде сегмента износа. Такая пара трения работает с переменным удельным давлением из-за увеличения площади пятна контакта по мере изнашивания. Как видно из табл. 1 и 2,

* ГОСТ 23.001-2004. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2005.

брусок метода хорды имеет малую массу, соизмеримую с погрешностью весов. Поэтому в этом случае применять способ взвешивания нежелательно по сравнению с серийной колодкой.

Метод искусственных баз с нарезанием лунок применяется в парах трения с колодками типа рис. 1, б, которые имеют контакт по всей длине поверхности с диском. Это обуславливает постоянство давления в пятне контакта и возможность применения либо метода взвешивания, либо способа нарезания лунок.

Отмечается сомнительная пригодность для этой цели классического способа нарезания удлиненных лунок алмазным резцом с помощью приспособления по ГОСТ 23.301-78 и ГОСТ 27860-88 по причине сложности его изготовления и применения.

Такую же лунку можно получить простейшим ювелирным инструментом в виде мини-болгарки. Недостатком обоих этих средств является малая глубина лунки порядка 0,16 мм при ее длине менее 4 мм, что необходимо учитывать в зависимости от области применения материала.

Анализ результатов многочисленных экспериментов позволил в качестве основного рабочего инструмента выбрать обычное сверло по ГОСТ 10902-77 с углом заточки 118° (рис. 6, а). Высокое качество и точность образования первичной круглой лунки диаметром до 4 мм обеспечиваются за счет фабричного изготовления и использования только режущей части сверла (рис. 6, б). При этом инструмент имеет низкую стоимость и малую трудоемкость оценки износа по простой тригонометрической функции.

Для обеспечения достоверности измерений в состав лабораторного оборудования следует включить электронный цифровой микроскоп с увеличением 50—500 крат в сочетании с ноутбуком. Программное обеспечение микроскопа должно включать программу распознавания образов для измерения фотографий искусственных баз любой формы, включая окружность. Точность нарезания лунок обеспечивается применением сверлильного станка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-ring Wear Test, norm G77-05 (Reapproved 2010), ASTM International, United States.
2. Испытание на износ блока на кольце NANOVEA [Электронный ресурс]: <<https://nanovea.com/block-on-ring-sliding-wear-evaluation/>>.
3. Хрущов М. М., Беркович Е. С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.
4. Хрущов М. М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / Отв. ред. И. Г. Горячева; 512 с.
5. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.
6. Ефремов Л. В., Тикалов А. В., Бреки А. Д. Ускоренные испытания стальных образцов на износостойкость методом искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 671—676.
7. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Метод оценивания линейной и объемной износостойкости материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 1. С. 58—63.
8. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Моделирование процесса изнашивания плоских образцов материалов на машине трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 163—169.

Сведения об авторах

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория трения и износа; гл. научный сотрудник;
E-mail: levlefr@mail.ru
- Андрей Владимирович Тикалов** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, кафедра машиноведения и основ конструирования;
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Поступила в редакцию 04.07.2022; одобрена после рецензирования 18.07.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. *Standard Test Method for Ranking resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-ring Wear Test*, norm G77–05 (Reapproved 2010), ASTM International, United States.
2. <https://nanovea.com/block-on-ring-sliding-wear-evaluation/>. (in Russ.)
3. Khrushchov M.M., Berkovich E.S. *Opredelenie iznosa detaley mashin metodom iskusstvennykh baz* (Determination of Wear of Machine Parts by the Method of Artificial Bases), Moscow, 1959, 217 p. (in Russ.)
4. Khrushchov M.M. *Treniye, iznos i mikrotverdost' materialov: Izbrannyye raboty* (Friction, Wear and Microhardness of Materials: Selected Works), Moscow, 2011, 510 p. (in Russ.)
5. Efremov L.V. *Problemy upravleniya nadezhnostno-oriyentirovannoy tekhnicheskoy ekspluatatsiyey mashin* (Problems of Managing Reliability-Oriented Technical Operation of Machines), St. Petersburg, 2015, 206 p. (in Russ.)
6. Efremov L.V., Tikalov A.V. Breki A.D. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 8(59), pp. 671–676. (in Russ.)
7. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 1(65), pp. 58–63. (in Russ.)
8. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 2(63), pp. 163–169. (in Russ.)

Data on authors

- Leonid V. Efremov** — Dr. Sci., Professor; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Department of Friction and Wear; Chief Researcher; E-mail: levlefr@mail.ru
- Andrey V. Tikalov** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design Basics; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Received 04.07.2022; approved after reviewing 18.07.2022; accepted for publication 31.10.2022.

**ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО КАК ОСНОВА
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ**

А. О. ЗЕНЕВИЧ¹, Т. М. МАНСУРОВ², Т. Г. КОВАЛЕНКО*¹,
Е. В. НОВИКОВ¹, С. В. ЖДАНОВИЧ¹, Т. А. МАТКОВСКАЯ¹

¹Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь
*tgkov@yandex.by

²Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Аннотация. В настоящее время для контроля различного рода объектов широко применяются датчики на основе оптического волокна, они обладают рядом преимуществ: электробезопасность, невосприимчивость к электромагнитным воздействиям, возможность использования в сочетании с оптическими волокнами, по которым передаются данные о состоянии контролируемых объектов или сред. Датчики на основе оптического волокна химически нейтральны и достаточно устойчивы к химическому воздействию различного рода, а также могут использоваться для контроля состояния объектов с легковоспламеняющимися и взрывоопасными жидкостями. Особый интерес в связи с этим представляет применение подобных датчиков в химической и пищевой промышленности для определения уровня жидкостей в производственных емкостях и измерения концентрации растворов. Цель работы — установить возможность использования оптического волокна как основы датчиков идентификации жидкостей и датчиков определения концентрации растворенных в воде веществ. Проанализированы рефлектограммы оптического волокна, полученные при нахождении торца оптического волокна в различных жидкостях. Определено, что величина пика рефлектограммы оптического волокна, соответствующего местоположению границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды, зависит от показателя преломления жидкости, в которой находится торец этого оптического волокна. Предложено использовать в качестве информационного параметра величину этого пика рефлектограммы для идентификации жидкостей, имеющих разные показатели преломления, а также определения концентрации растворенных в воде веществ. Доказана возможность использования оптического волокна в сочетании с методом оптической рефлектометрии для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов.

Ключевые слова: оптическое волокно, коэффициент отражения, показатель преломления, рефлектометр, концентрация раствора

Ссылка для цитирования: Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В., Матковская Т. А. Оптическое волокно как основа для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 895—901. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901.

**OPTICAL FIBER AS A BASIS FOR CREATING SENSORS FOR IDENTIFYING LIQUIDS
AND DETERMINING THE CONCENTRATION OF SOLUTIONS**

A. O. Zenevich¹, T. M. Mansurov², T. G. Kovalenko*¹,
E. V. Novikov¹, S. V. Zhdanovich¹, T. A. Matkovskaia¹

¹Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus
*tgkov@yandex.by

²Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Abstract. Currently, sensors based on optical fiber are widely used to control various kinds of objects. Compared with other types of sensors, such sensors have a number of advantages, such as: electrical safety, immunity to electromagnetic influences, the ability to use in combination with optical fibers that transmit data on the state of controlled objects or environments. Fiber-optic sensors are chemically neutral and sufficiently resistant to chemical effects of various kinds, and can also be used to monitor the condition of objects with flammable and explosive liquids. Of particular interest in this regard is the use of such sensors in the chemical and food industries to determine the presence and level of liquids in production containers and measure the concentration of solutions. The possibility of using optical fiber as the basis for sensors for identifying liquids and sensors for determining the concentration of substances dissolved in water is established. Reflectograms of an optical fiber obtained by immersing the end of the fiber in various liquids are analyzed.

It is found that magnitude of the peak of the optical fiber reflectogram corresponding to the location of the interface between the core of the optical fiber and the environment, and depends on the refractive index of the liquid in which the end of this optical fiber is located. It is proposed to use the value of this reflectogram peak as an information parameter for identifying liquids having different refractive indices, as well as determining the concentration of substances dissolved in water. The possibility of using an optical fiber in combination with the method of optical reflectometry to create sensors for identifying liquids and determining the concentration of solutions is proved.

Keywords: optical fiber, reflection coefficient, refractive index, reflectometer, solution concentration

For citation: Zenevich A. O., Mansurov T. M., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V., Matkovskaia T. A. Optical fiber as a basis for creating sensors for identifying liquids and determining the concentration of solutions. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 895—901 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901.

Введение. В настоящее время для контроля состояния объектов и измерения их параметров широко применяются датчики на основе оптического волокна [1—4]. По сравнению с другими видами датчиков они имеют ряд преимуществ, к числу которых можно отнести электробезопасность, невосприимчивость к электромагнитным воздействиям, возможность использования в сочетании с оптическими волокнами, по которым передаются данные о состоянии контролируемых объектов или сред.

Подобные датчики позволяют исключить преобразование электрического сигнала в оптический, упрощают построение систем диагностики, а также обеспечивают контроль состояния объектов, находящихся на значительном расстоянии от места сбора и анализа данных.

Кроме того, датчики на основе оптоволокна химически нейтральны и достаточно устойчивы к химическому воздействию различного рода, а также могут быть использованы для контроля состояния объектов с легковоспламеняющимися и взрывоопасными жидкостями [5]. Особый интерес в связи с этим представляет применение подобных датчиков в химической и пищевой промышленности для определения наличия жидкостей (и их уровня) в производственных емкостях и измерения концентрации растворов.

В связи с этим целью настоящей работы является определение возможности использования оптического волокна как основы датчиков для идентификации жидкостей и датчиков определения концентрации растворенных в воде веществ.

Экспериментальная установка и методика исследований. На рис. 1 представлена структура экспериментальной установки для исследования возможности использования оптического волокна в качестве основы датчиков определения концентрации растворенных в воде веществ и датчиков для идентификации жидкостей.

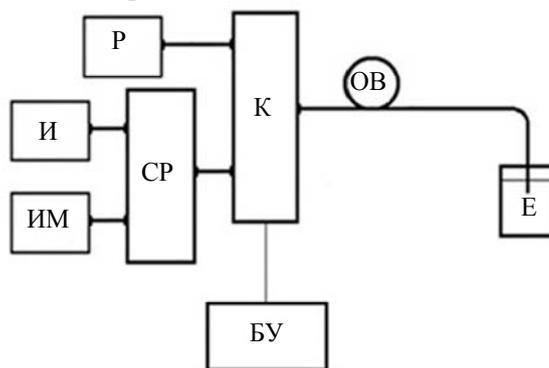


Рис. 1

В экспериментальной установке источник оптического излучения И подключался к одному из входов двунаправленного пассивного смесителя-разветвителя оптических сигналов СП. Ко второму входу этого смесителя-разветвителя подключен измеритель мощности оптического излучения ИМ. Выход смесителя-разветвителя подключен к одному из входов опти-

ческого коммутатора К. Ко второму входу коммутатора подсоединен рефлектометр Р. Выход оптического коммутатора соединен со входом оптического волокна ОВ. Блок управления БУ управляет работой оптического коммутатора, который подключает ОВ к выходу рефлектометра или к выходу СР.

При проведении измерений оптическое излучение от И через пассивный двунаправленный смеситель-разветвитель оптических сигналов подается на вход управляемого коммутатора, который направляет его в оптическое волокно. Оптическое излучение распространяется по оптическому волокну, достигая его выхода. В точке соприкосновения торца ОВ с внешней средой часть оптического излучения выходит за пределы оптического волокна во внешнюю среду, а часть излучения отражается от границы раздела сердцевинки волокна и среды и поступает обратно. Отраженная часть излучения распространяется по оптическому волокну и через оптический коммутатор направляется на смеситель-разветвитель и поступает на источник, а также на измеритель мощности оптического излучения. При этом смеситель-разветвитель разделяет отраженное излучение на две равные доли. Использование смесителя-разветвителя с таким коэффициентом деления обеспечивает достаточную для регистрации величину мощности отраженного сигнала. Другие коэффициенты деления приводят либо к необходимости увеличения мощности оптического излучения источника для получения достаточной для регистрации величины мощности отраженного сигнала, либо к уменьшению доли мощности отраженного излучения, поступающего на измеритель мощности.

Значение мощности, поступающей от источника через смеситель-разветвитель оптических сигналов в измеритель мощности, меньше порогового значения. В качестве ИМ используется калиброванный и поверенный тестер ОТ-3-1, который измеряет величину поступившей на него отраженной мощности оптического излучения.

Если коммутатор подключает ко входу оптического волокна рефлектометр, то последний обеспечивает регистрацию рефлектограммы этого волокна. Отметим, что в экспериментальной установке в качестве рефлектометра использовался калиброванный и поверенный многофункциональный оптический измерительный прибор МТР 6000.

Объектом исследований выступали серийно выпускаемые одномодовые оптические волокна G657. Выбор этого типа волокна связан, с одной стороны, с тем, что оно весьма часто используется в оптических кабелях. С другой стороны, использование G657 позволяет упростить процесс сопряжения датчика на основе такого оптоволокна с кабелем, используемым в системах мониторинга различных объектов для передачи данных [6]. Это волокно также устойчиво к изгибам, и к его монтажу не предъявляются строгие требования [7].

Во время проведения исследований торец волокна размещался в емкости с различными жидкостями, а также водными растворами определенного вещества, его вид и концентрация вещества в растворе менялись. Торец волокна фиксировался в емкости на 2—3 см ниже поверхности жидкости (см. рис. 1: Е — емкость с жидкостью).

По результатам исследований определялся коэффициент отражения от границы раздела сердцевинки волокна и окружающей среды. Под коэффициентом отражения k понимается величина, характеризующая способность тела (объекта) отражать падающее на него излучение:

$$k = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{п}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $P_{\text{п}}$ — мощность оптического излучения, падающая на границу раздела сердцевинки волокна и окружающей среды; $P_{\text{отр}}$ — мощность оптического излучения отраженного от границы раздела сердцевинки оптического волокна и окружающей среды.

Значение $P_{\text{п}}$ определяется на основе значения мощности $P_{\text{и}}$ источника оптического излучения с учетом потери мощности излучения в смесителе-разветвителе и оптическом коммутаторе, а также в оптическом волокне. Для этого использовалась следующая формула:

$$P_{\Pi} = bP_{И} \exp(-\alpha l), \quad (2)$$

где b — коэффициент, характеризующий потери мощности оптического излучения источника в смесителе-разветвителе и оптическом коммутаторе; α — коэффициент, характеризующий потери мощности излучения, приходящиеся на единицу длины оптического волокна; l — длина оптического волокна.

Величина $P_{отр}$ вычисляется на основе измеренного значения мощности оптического излучения P , регистрируемого измерителем мощности. При этом учитывалось, что обратно отраженное в оптическое волокно излучение также претерпевает потери мощности по длине волокна l . Также необходимо учесть, что на ИМ поступает только половина мощности обратно отраженного излучения, достигшего выхода смесителя-разветвителя:

$$P_{отр} = \frac{2P}{\exp(-\alpha l)}. \quad (3)$$

В процессе эксперимента протяженность оптического волокна $l = 500$ м не изменялась, а длина волны оптического излучения составляла 1310 нм. Эта длина волны соответствует „окну прозрачности“ одномодового оптического волокна [8—11]. При этом величина $\exp(-\alpha l) = 0,58$; $b = 0,46$. Мощность оптического излучения источника оставалась постоянной $P_{И} = 10$ мВт. Длительность оптического импульса рефлектометра, при которой измерялись рефлектограммы, составляла 3,0 нс.

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

Результаты исследований и их обсуждение. При проведении исследований в качестве тестовых веществ выступали воздух и жидкости, имеющие различные показатели преломления. Данные о показателях преломления воздуха и жидкостей, а также полученные для этих веществ значения коэффициента отражения от границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды представлены в таблице.

Вещество	Показатель преломления оптического излучения	Коэффициент отражения, %
Воздух	1,000	2,73
Вода	1,333	0,19
Изопропиловый спирт	1,377	0,08
Глицерин	1,471	0,02

Отметим, что сведения о показателях преломления веществ взяты из работы [12], а значения величины k были определены на основании экспериментальных данных по формулам (1)—(3).

В результате исследований получены рефлектограммы оптического волокна при помещении торца оптического волокна в различные среды. Каждая рефлектограмма содержала пик, соответствующий местоположению границы раздела сердцевины волокна и окружающей среды. Наличие пика обусловлено отражением оптического излучения от этой границы. На рис. 2 представлены участки рефлектограмм, на которых отображен этот пик (1 — воздух; 2 — вода; 3 — изопропиловый спирт; 4 — глицерин). Величина пика зависела от того, в каком веществе оказывался торец оптического волокна. Отметим, что под величиной пика Δa подразумевалась разность между максимальным значением уровня мощности для этого пика и уровнем мощности в точке начала этого пика (с левой стороны от пика).

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

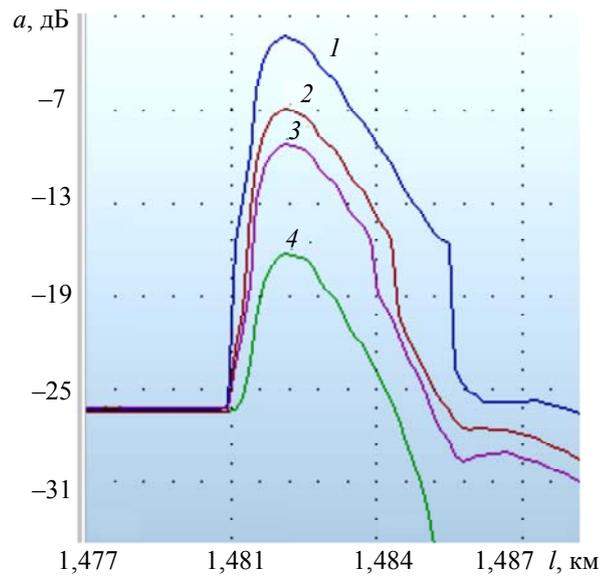


Рис. 2

Как видно из рис. 2, для веществ с большим коэффициентом отражения (см. таблицу) Δa больше, чем для веществ с меньшим значением коэффициента отражения. Таким образом, можно утверждать, что величина Δa и коэффициент отражения k взаимосвязаны. Поэтому Δa можно использовать как информативный параметр для идентификации веществ, имеющих разные показатели преломления.

Исследовались также зависимости информативного параметра Δa от концентрации C водных растворов сахара и изопропилового спирта. Полученные зависимости информативного параметра Δa от концентрации C представлены на рис. 3 (1 — раствор изопропилового спирта; 2 — раствор сахара) и в исследуемом диапазоне концентраций хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, причем увеличение концентрации раствора приводило к уменьшению Δa . Такое поведение связано с тем, что с увеличением концентрации повышался показатель преломления для раствора и эта величина приближалась к значению показателя преломления сердцевины оптического волокна. В результате уменьшался коэффициент отражения k (см. таблицу), а значит, и величина Δa .

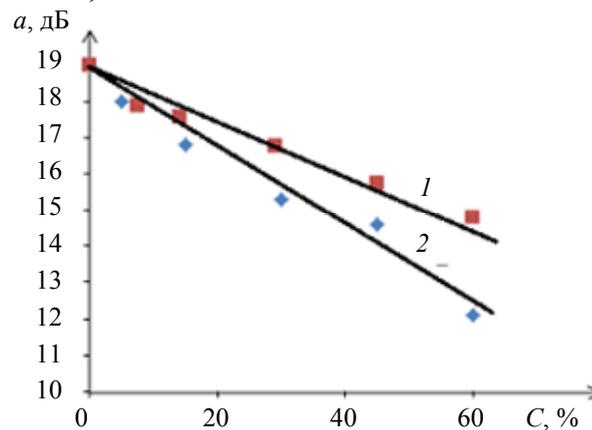


Рис. 3

Как видно из рис. 3, угол наклона зависимостей величины Δa от концентрации раствора C различается для водного раствора сахара и для водного раствора изопропилового спирта. Это можно объяснить тем, что у данных растворов от их концентрации по-разному зависят показатели преломления. Зависимости начинаются из одной точки, поскольку при $C = 0$ у всех растворов показатель преломления равен показателю преломления воды. Для максимальной концентрации раствора изопропилового спирта показатель преломления не может превышать

1,377 (см. таблицу). Согласно работам [13, 14], для концентрации раствора сахара в воде $C = 60\%$ показатель преломления составляет 1,442 и достаточно близок к показателю преломления сердцевинны оптического волокна.

Заключение. Показано, что величина пика рефлектограммы, соответствующего местоположению границы раздела сердцевинны оптического волокна и окружающей среды, зависит от показателя преломления вещества, в котором находится торец волокна. Предложено использовать величину пика в качестве информационного параметра для идентификации жидкостей, имеющих разные показатели преломления, а также для определения концентрации водных растворов.

Таким образом, доказана возможность использования оптического волокна в сочетании с методом оптической рефлектометрии для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
2. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
3. Fidanboyly K., Efendioğlu H. S. Fiber optic sensors and their applications // 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09). 13—15 May 2009, Karabuk, Turkey. P. 1—6.
4. Iniewski K., Rajan G. Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2015.
5. Вяльшиев А. И., Добров В. М., Долгов А. А. и др. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга // Природообустройство. 2014. № 3. С. 32—37.
6. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАПарт, 2003. 288 с.
7. Recommendation ITU-T G.657 (11/2016) Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2017. 24 p.
8. Дмитриев С. А., Слепов Н. Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М.: Техносфера, 2010. 607 с.
9. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Тренз, 2001. 267 с.
10. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб: Лань, 2021. 268 с.
11. Kumar Sh., Jamal Deen M. Fiber optic communications. Fundamentals and applications. NJ: John Wiley & Sons, 2014. 573 p.
12. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 848 с.
13. Кириченко Н. А. Принципы оптики. М.: МФТИ, 2016. 308 с.
14. Бутиков Е. И. Оптика. СПб: Лань, 2012. 608 с.

Сведения об авторах

- Андрей Олегович Зеневич** — д-р техн. наук, профессор; Белорусской государственной академии связи; ректор E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Тофиг Магомедович Мансуров** — д-р техн. наук, профессор; Азербайджанский технический университет, кафедра радиотехники и коммуникации; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru
- Татьяна Георгиевна Коваленко** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tgkov@yandex.by
- Евгений Владимирович Новиков** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, директор Института современных технологий связи; E-mail: e.novikov@bsac.by

- Сергей Вячеславович Жданович** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи; лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Татьяна Александровна Матковская** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tandem7m@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.22; одобрена после рецензирования 24.08.22; принята к публикации 31.10.22.

REFERENCES

1. Udd E., ed., *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, NY, John Wiley & Sons, 2011, 512 p., DOI: 10.1002/9781118014103.
2. Okoshi T., Okamoto K., Otsu M., Nishihara H., Kyuma K., Hatate K. *Volokonno-opticheskiye datchiki* (Fiber Optic Sensors), Leningrad, 1990, 256 p. (in Russ.)
3. Fidanboyly K., Efendioğlu H.S. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, May 13–15, 2009, Karabuk, Turkey, pp. 1–6.
4. Iniewski K., Rajan G. *Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications*, Boca Raton, CRC Press, 2015.
5. Vyalyshv A.I., Dobrov V.M., Dolgov A.A. et al. *Prirodoobustroystvo*, 2014, no. 3, pp. 32–37. (in Russ.)
6. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskiye volokna dlya liniy svyazi* (Optical Fibers for Communication Lines), Moscow, 2003, 288 p. (in Russ.)
7. *Recommendation ITU-T G.657 (11/2016) Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*, Geneva, 2017, 24 p.
8. Dmitriyev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoye sostoyaniye i novyye perspektivy* (Fiber-Optic Technology: State of the Art and New Perspectives), Moscow, 2010, 607 p. (in Russ.)
9. Ubaidullaev R.R. *Volokonno-opticheskiye seti* (Fiber Optic Networks), Moscow, 2001, 267 p. (in Russ.)
10. Sklyarov O.K. *Volokonno-opticheskiye seti i sistemy svyazi* (Fiber Optic Networks and Communication Systems), St. Petersburg, 2021, 268 p. (in Russ.)
11. Kumar Sh., Jamal Deen M. *Fiber Optic Communications. Fundamentals and Applications*, NJ, John Wiley & Sons, 2014, 573 p.
12. Landsberg G.S. *Optika* (Optics), Moscow, 2010, 848 p. (in Russ.)
13. Kirichenko N.A. *Printsipy optiki* (Principles of Optics), Moscow, 2016, 308 p. (in Russ.)
14. Butikov E.I. *Optika* (Optics), St. Petersburg, 2012, 608 p. (in Russ.)

Data on authors

- Andrey O. Zenevich** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Tofiq M. Mansurov** — Dr. Sci., Professor; Azerbaijan Technical University, Department of Radio Engineering and Communication; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru
- Tatiana G. Kovalenko** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tgkov@yandex.by
- Evgeny V. Novikov** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Communication Technologies; Director of the Institute; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Sergey V. Zhdanovich** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Tatiana A. Matkovskaia** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tandem7m@gmail.com

Received 01.07.22; approved after reviewing 24.08.22; accepted for publication 31.10.22.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА НОВИЗНЫ УСТРОЙСТВА ПО ФОРМУЛЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

А. Б. БУШУЕВ^{*1}, Н. А. ДУДАРЕНКО¹, Ю. В. ЛИТВИНОВ², О. К. МАНСУРОВА³

¹ *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
**bushuev@inbox.ru*

² *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Предложена методика численной оценки новизны по двум типам моделей технической системы, составленных на основе патентной формулы нового решения и прототипа. Первый тип представляет собой структурную схему в виде направленного графа из признаков изобретения. Второй тип строится как поток преобразования энергии и информации от входа устройства до его выхода. Коэффициент новизны оценивается по степени асимметрии схем для прототипа и нового решения. Симметрией обладают признаки изобретения, входящие в ограничительную часть формулы. Отличительная часть формулы вносит асимметрию. В структурной схеме графа признаки ранжируются по уровням, и каждому уровню присваивается свой вес. В информационно-энергетической модели для численной оценки физических величин используется теория размерностей. Ресурсоемкость величин рассчитывается в системе кинематических величин Бартини. Подробно рассмотрен пример численной оценки новизны мембранного датчика давления.

Ключевые слова: оценка новизны, формула изобретения, прототип, нарушение симметрии, физическая величина, теория размерностей, базис Бартини, передаточная матрица, ресурсоемкость

Ссылка для цитирования: Бушуев А. Б., Дударенко Н. А., Литвинов Ю. В., Мансурова О. К. Численная оценка новизны устройства по формуле изобретения // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 902—915. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-902-915.

NUMERICAL ASSESSMENT OF A DEVICE NOVELTY ACCORDING TO THE INVENTION FORMULA

A. B. Bushuev^{1*}, N. A. Dudarenko¹, Yu. V. Litvinov², O. K. Mansurova³

¹ *ITMO University, St. Petersburg, Russia*
bushuev@inbox.ru

² *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia*

³ *St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia*

Abstract. A technique for numerical evaluation of novelty is proposed for two types of technical system models, compiled on the basis of the patent formula of a new solution and a prototype. The first type is a block diagram in the form of a directed graph of the features of the invention. The second type is built as a flow of energy and information conversion from the input of the device to its output. The novelty coefficient is estimated by the degree of asymmetry of the schemes for the prototype and the new solution. The signs of the invention included in the restrictive part of the formula have symmetry. The distinctive part of the formula introduces asymmetry. In the block diagram of the graph, features are ranked by levels, and each level is assigned its own weight. In the information-energy model for the numerical evaluation of physical quantities, the theory of dimensions is used. The resource intensity of values is calculated in the system of kinematic values of Bartini. An example of a numerical assessment of the novelty of a membrane pressure sensor is considered in detail.

Keywords: novelty evaluation, formula of invention, prototype, symmetry breaking, physical quantity, dimension theory, Bartini basis, transfer matrix, resource capacity

For citation: Bushuev A. B., Dudarenko N. A., Litvinov Yu. V., Mansurova O. K. Numerical assessment of a device novelty according to the invention formula. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 902—915 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-902-915.

Введение. Критерий новизны является первичным для определения патентоспособности технического решения. Изобретение является новым, если оно не известно из уровня техники*. Практически новизна определяется путем сравнения патентных формул заявленного решения с прототипом и аналогами. Если заявленное решение отличается от прототипа хотя бы одним признаком, оно считается новым. Таким образом, патентное право не дает ответа, насколько количественно изобретение является новым.

В работе [1] предполагается, что существует некоторая область новизны, в которой изобретение внедряется с наибольшей вероятностью. Численно новизна рассчитывается по частоте ссылок на аналоги изобретения, определяемые в компьютерном патентном поиске при заданном индексе международной патентной классификации. При этом техническая сущность, т.е. признаки изобретения, не рассматривается.

В статье [2] новизна идей определяется путем парных сравнений N идей случайно выбранными людьми. Степень новизны рассчитывается по формуле

$$Nov(i) = \sum_{j=1}^N d_{i,j},$$

где $Nov(i)$ — новизна i -й идеи, $i = 1, \dots, N$; $d_{i,j}$ — расстояние от идеи i до j по пятибалльной шкале Лайкерта, $j = 1, \dots, N$.

В статье [3] рассматривается методика определения новизны некоторой решаемой задачи, раскладываемой на ключевые функции или характеристики. Каждой функции экспертом присваивается вес f_j , отражающий важность функции для определения задачи. Новизна M оценивается по формуле

$$M = \sum_{j=1}^m f_j \sum_{k=1}^n S_{j,k} p_k,$$

где f_j — вес j -й функции, $j=1, \dots, m$, m — число ключевых функций или характеристик; $S_{j,k}$ — изменение степени новизны на разных стадиях развития задачи, $k=1, \dots, n$, n — число стадий; p_k — вес k -й стадии. Если рассматривать такую методику применительно к патентной формуле, то характеристиками будут признаки изобретения, а стадий две: первая — это прототип, а вторая — это новое решение. Недостатком является субъективность назначения весов экспертом.

В работе [4] коэффициент новизны технической системы рассчитывается по круговой диаграмме, состоящей из десяти концентрических окружностей, образующих шкалу показателей качества. Показатели качества откладываются по лучам диаграммы, концы которых соединяются прямыми. Затем находится площадь полученного многоугольника. Коэффициент новизны определяется отношением площадей диаграмм S_2/S_1 , где S_2 — площадь диаграммы нового решения, S_1 — площадь диаграммы прототипа. Для показателей качества, или ключевых характеристик, используются тренды законов развития технических систем, разработанных в теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [5]. Длина луча по каждому из

* Гражданский кодекс Российской Федерации. Ч. 4, статья 1350.

двадцати четырех трендов назначается экспертом. Таким образом, можно сделать вывод, что новизна определяется путем сравнения двух сущностей, или характеристик.

Интересно отметить, что в статье [6] рассматривается новизна в стихосложении, и в качестве этих характеристик предлагается выбирать две противоположности, существующие одновременно в одном пространстве, или дискретные, существующие разновременно, что характерно для так называемого системного оператора ТРИЗ. Прототип и новое решение в некотором смысле противоположны, так как новое отрицает старое решение в результате противоречий между прошлым и настоящим. Таким образом, здесь также две стадии, но отличие состоит в том, что сущности, или характеристики, альтернативны.

Для численной оценки противоречий необходимо иметь их математические модели. Впервые такие модели были представлены в работах Ю. М. Горского по компенсационным гомеостатам, сначала для противоречий в электротехнических, а затем и в биологических, и социальных системах [7]. Ю. М. Горский рассматривал устойчивость гомеостата при асимметрии антагонистов, образующих его, и установил, что существует некоторая граница асимметрии, при которой устойчивость нарушается.

В монографии [8] отмечено, что тело, обладающее весовой и геометрической симметрией, имеет суженный спектр частот собственных колебаний, что соответствует большей устойчивости. Величина весовой асимметрии определяется по формуле $E_B = 1 - P_M / P_B$, где P_B и P_M — больший и меньший из весов геометрически симметричных половин тела. Величина геометрической асимметрии определяется по формуле $E_G = 1 - V_M / V_B$, где V_B и V_M — больший и меньший из объемов симметричных по весу половин тела. В [8] делается вывод, что симметрия производит на людей впечатление мертвого, застывшего, неизменного, а асимметрия — нарушение ритма, пропорций, диссонансы — выражает динамику объективного мира.

Численная оценка структурной асимметрии системы дифференциальных уравнений аттрактора Лоренца, которая используется для моделирования технических противоречий в изобретательской задаче, рассмотрена в статье [9]. Здесь также отмечается, что нарушение симметрии является важнейшим условием получения новых знаний, изобретений, информации. Действительно, информация, по определению К. Шеннона, — это снятая неопределенность [10]. По определению В. М. Глушкова, информация — мера неоднородности распределения материи и энергии в пространстве и времени [11]. Таким образом, сняв неопределенность, можно получить новую информацию, т.е. сведения, неизвестные априори. В работе [12] отмечается, что информация при хаотическом движении порождается каскадами бифуркаций, приводящих к нарушению симметрии. Допустим, что имеется некоторый геометрический объект — прототип, по которому надо воспроизвести новое решение. Для этого достаточно передать информацию (координаты) всех точек объекта, но эта информация не будет новой, она известна априори. Новая информация получается в результате случайного выбора знака в точке бифуркации. Например, при выборе отрицательного знака получается зеркальная симметрия нового решения относительно прототипа и всего лишь 1 бит информации. Чем асимметричнее новое решение, тем больше изобретатель должен сгенерировать новой информации, чтобы можно было воспроизвести это решение. Неоднократная воспроизводимость является необходимым условием выполнения критерия промышленной применимости изобретения.

На основе обзора аналогов поставим следующую задачу — по патентной формуле численно оценить степень новизны изобретения, возникающей из-за нарушения симметрии между прототипом и новым решением.

Постановка задачи. Пусть заданы два объекта: прототип $A = \{P_i\}$, где P_i — множество признаков патентной формулы прототипа, $i = 1, \dots, m$, и новое решение $B = \{P_j, N_j\}$, где P_j — множество признаков патентной формулы ограничительной части нового решения, т.е. признаков, общих с признаками прототипа, $j = 1, \dots, k$, $k \leq m$, $k = 1, \dots, m$, N_j — множество признаков

отличительной части патентной формулы нового решения, $j = 1, \dots, n$. В соответствии с [13] составим так называемую контрастную модель, которая выражает сходство, соответствие $S(A, B)$ между объектами A и B как линейную комбинацию мер их общих и отличительных признаков. В общем случае модель используется для анализа асимметричных свойств любых объектов.

Введем соответствие

$$S(A, B) = F(A \cap B, A - B, B - A), \quad (1)$$

где $S(A, B)$ является функцией F от трех аргументов: $A \cap B$, т.е. признаков, общих как для A , так и для B , $A - B$, т.е. признаков, принадлежащих только A , но не B , $B - A$, т.е. признаков, принадлежащих только B , но не A . Для патентных формул записать

$$\begin{aligned} A \cap B &= \begin{cases} \{P_i\}, & i = 1, \dots, k, \quad k < m, \\ \{P_i\}, & i = 1, \dots, m, \quad k = m, \end{cases} \\ A - B &= \begin{cases} \{P_i\}, & i = k + 1, \dots, m, \quad k < m, \\ \{0\}, & i = 1, \dots, m, \quad k = m, \end{cases} \\ B - A &= \{N_j\}, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (2)$$

При $k = m$ все m признаков прототипа переходят в ограничительную часть нового изобретения. Оставшийся без признаков прототип образует пустое множество $\{0\}$ признаков. Такое изобретение называется дополнительным. При $k < m$ только первые k признаков прототипа переходят в ограничительную часть нового изобретения, а $m - k$ признаков остаются в прототипе, т.е. в старом решении. Такие изобретения встречаются наиболее часто.

На рис. 1 приведена диаграмма множеств признаков (прототип заштрихован) для случая $k = m$ (а) и для случая $k < m$ (б).

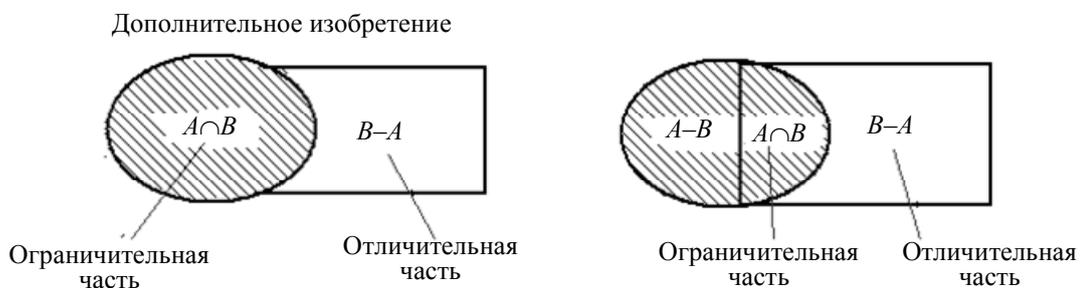


Рис. 1

Численно степень симметрии E между объектами A и B можно рассчитать по формуле [14]:

$$E = F(A \cap B) / [F(A \cap B) + \alpha F(A - B) + \beta F(B - A)], \quad (3)$$

где α и β — некоторые весовые коэффициенты, позволяющие учесть вклад разных признаков. Оценка E является отношением функции общих для A и B признаков к сумме функций всех признаков, общих и разных для A и B . Если разные признаки отсутствуют, тогда $E = 1$, объекты симметричны. При появлении разных признаков появляется асимметрия, значение E снижается. Величина уменьшения говорит о степени асимметрии объектов.

Определение функции соответствия для признаков формул изобретений. Будем рассматривать изобретения-устройства и полезные модели, в патентных формулах которых используются следующие признаки:

- 1) наличие конструктивных элементов;
- 2) наличие связи между элементами;
- 3) взаимное расположение элементов;

- 4) форма выполнения элемента или устройства в целом, в частности, геометрическая форма;
- 5) форма связи между элементами;
- 6) параметры элементов и устройства в целом;
- 7) материал, из которого выполнен элемент или устройство в целом; среда, выполняющая функцию элемента.

По правилам составления описания изобретения [15], других типов признаков в патентной формуле устройства быть не может. Другие типы, например наличие действий над материальными объектами или последовательность действий, используются в патентных формулах способов и здесь не рассматриваются.

Для нахождения численного значения степени симметрии или асимметрии E (3) необходимо задать функцию соответствия $S(A,B)$ (1), т.е. определить некоторое правило F , по которому можно численно сравнивать признаки формулы между собой. При патентной экспертизе изобретение считается новым, если его патентная формула имеет хотя бы один отличительный признак, который и нарушает симметрию с прототипом. Однако степень нарушения симметрии, численное значение новизны, не определяется. Для расчета вклада признаков в формулу, определения весов в (3), рассмотрим два структурных метода.

В первом методе признаки разделяются на уровни иерархии, по уровням строится „дерево“ [16] формулы изобретения, и вес признака определяется по степени объема защиты этим признаком конструкции устройства.

Во втором методе используются не только формула изобретения, но и описание работы устройства, по которым строится информационно-энергетическая схема (ИЭС). ИЭС отражает потоковую функциональную структуру [17] технической системы и используются для синтеза физического принципа действия устройства [18]. Геометрически ИЭС представляет ориентированный граф с вершинами из блоков преобразования одного вида энергии в другой. Вес вершины определяется по затратам ресурсов на преобразование. Рассмотрим более подробно каждый из методов.

Определение функции соответствия по структуре формулы изобретений. Введем бинарное отношение R „не существует без“ между признаками P_q и P_g , т.е. запись $P_q R P_g$ означает, что признак P_q не существует без признака P_g . Следовательно, можно сказать, что признак P_q находится в некотором подчинении у признака P_g . Устанавливая наличие или отсутствие бинарных отношений между всеми признаками устройства, можно построить его структурную схему в виде некоторого иерархического графа. На структурной схеме будем обозначать признаки вершинами графа, а отношения R между признаками — ребрами графа. Введем ориентацию в графе, обозначив отношения подчиненности стрелками на ребрах. По степени подчиненности все признаки разделяются на три уровня иерархии. Высший уровень образуют признаки конструктивных элементов, к ним стрелки не подходят, т.е. эти признаки ничему не подчиняются. Средний уровень иерархии образуют признаки, характеризующие межэлементные отношения, т.е. связи и взаиморасположение элементов. К ним подходят две стрелки, т.е. такие признаки подчиняются двум признакам высшего уровня. Низший уровень иерархии образуют остальные признаки, характеризующие свойства элементов или связей, например, форма элемента, материал элемента и др. К таким признакам подходит одна стрелка от признаков более высокого уровня.

Присвоим признакам высшего уровня структурную силу $F = 3 - 0,5a_g$ балла, среднего уровня $F = 2 - 0,5a_g$, низшего уровня $F = 1$, где a_g — вес признака P_g , равный числу подчиненных, т.е. числу исходящих от P_g стрелок. Чем больше связей у признака более высокого уровня с признаками более низкого уровня, тем слабее признак высокого уровня. Любая связь конкретизирует признак, т.е. снижает объем защиты. Например, если в патентной формуле имеется „металлический вал“, то признак „деревянный вал“ или „полимерный вал“ дает но-

вое решение. А если материал не указан, то формула защищает больший объем прав, т.е. вал из любого материала. При замене материала надо доказывать неочевидность такого признака, иначе заявленное решение не будет иметь изобретательского уровня.

Сумма структурных сил признаков P_i , входящих в ограничительную часть формулы изобретения, т.е. общих для прототипа и нового решения, будет равна

$$F(A \cap B) = \sum_{i=1}^k F_i, \quad (4)$$

для отличительной части формулы

$$F(B - A) = \sum_{j=1}^n F_j, \quad (5)$$

для части признаков прототипа, не вошедших в ограничительную часть нового решения

$$F(A - B) = \sum_{i=k+1}^m F_i, \quad (6)$$

где F_i — сила признака P_i , F_j — сила признака N_j . Далее по выражению (3) численно рассчитывается степень нарушения симметрии.

Определение функции соответствия по информационно-энергетической схеме. Устройство разбивается на элементы, узлы, детали, которые образуют блоки структуры и называются веществами — В. Вещества передают энергию и преобразуют один вид энергии в другой. Виды энергии определяются полями Π — механическими, тепловыми, электрическими, магнитными. Направление потока энергии указывается стрелками, например, $\Pi_1 \rightarrow V_1 \rightarrow \Pi_2 \rightarrow V_2$. Такая структура в ТРИЗ называется вепольной, она помогает выбирать физические эффекты при синтезе принципа действия. ИЭС получается из вепольной структуры путем замены полей на физические величины, в которых измеряются эти поля. Например, если вещество V_1 является пьезокристаллом и реализует прямой пьезоэффект, то механическое поле Π_1 будет силой, измеряемой в ньютонах, а электрическое поле Π_2 будет зарядом, измеряемым в кулонах.

Для численной оценки ИЭС используется информация о размерностях физических величин в той или иной системе измерений, например СИ или в системе кинематических величин Р.Л. Бартини [19], которая имеет две основных единицы измерения — L (метр) и T (секунда). В [20] предлагается задавать размерности входных и выходных величин блоков ИЭС в базисе Бартини в виде квадратных матриц, а сами блоки задавать передаточными матрицами, т.е. отношением выходной матрицы к входной. Численная оценка затрат ресурсов времени и пространства на преобразование в блоке будет равна евклидовой норме передаточной матрицы. Далее граф разбивается на две части, одна моделирует ограничительную часть формулы изобретения, а другая — отличительную. Весовые коэффициенты вершин графа используются для вычисления асимметрии в (3).

Пример численного расчета. Рассмотрим датчик давления [21, 22]. Пример выбран из следующих соображений: срок охранного документа истек, поэтому можно использовать графический материал без разрешения авторов; формула изобретения компактна, она позволяет минимизировать объем настоящей статьи без потери общности; замкнутая структура устройства с обратной связью, для которой, кроме новизны, можно рассчитать некоторые другие показатели качества, отличающие новое решение от прототипа.

Описание нового решения и прототипа. Конструкция датчика давления представлена на рис. 2, а, а конструкция прототипа [22] — на рис. 2, б.

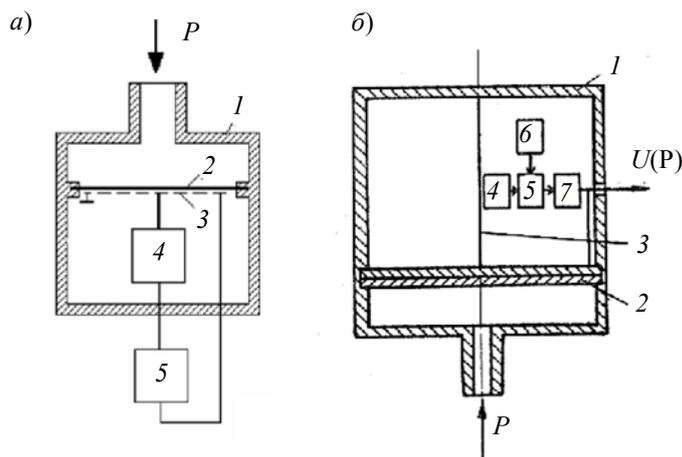


Рис. 2

На рис. 2, а датчик содержит корпус 1, внутри которого установлена мембрана 2, выполненная из металла с памятью формы. На мембране установлен пленочный нагреватель 3. Под действием давления P мембрана прогибается, в местах крепления действует на корпус. Максимальный прогиб мембраны в ее центре перемещает шток преобразователя 4, электрический сигнал с которого несет информацию о давлении. Одновременно сигнал с преобразователя усиливается в усилителе 5 и подается на нагреватель 3. Под действием нагрева мембрана за счет эффекта памяти формы возвращается в первоначальное состояние.

Прототип датчика давления (рис. 2, б) работает следующим образом. При изменении контролируемого давления P биморфный элемент 2, установленный в корпусе 1, деформируется, изменяется натяжение чувствительного элемента 3 автогенератора 4, изменяется его частота, которая в элементе сравнения 5 сравнивается с частотой эталонного генератора 6. Сигнал рассогласования через усилитель 7 подается на биморфный элемент 2, в котором используется обратный пьезоэффект. Под действием электрического напряжения биморфный элемент 2 прогибается в сторону, противоположную действию давления P , восстанавливая динамическое равновесие. Сигнал измеренного давления $U(P)$ с выхода усилителя 7 поступает на регистратор (на рис. 2, б не указан).

Новое решение [21] имеет следующую формулу изобретения: датчик давления, содержащий корпус, в котором закреплена мембрана, связанная с преобразователем перемещений, к выходу которого подключен усилитель, отличающийся тем, что с целью расширения диапазона измерений он снабжен нагревательным элементом, установленным на мембране и подключенным к выходу усилителя, а мембрана выполнена из металла с деформационной памятью.

Прототип имеет следующую формулу изобретения: датчик давления, содержащий установленные в корпусе мембрану и усилитель, соединенный с регистратором, отличающийся тем, что с целью повышения точности измерений он снабжен генератором эталонной частоты с блоком сравнения, причем входы блока сравнения соединены с выходами автогенератора и генератора эталонной частоты, а выход блока сравнения соединен с усилителем, выход которого гальванически соединен с мембраной, выполненной в виде биморфного элемента.

Расчет степени асимметрии по структурной схеме формулы изобретения. Сначала пронумеруем по порядку признаки устройств, начиная с признаков ограничительной части нового решения, т.е. объекта B : P_1 — корпус, P_2 — мембрана, P_3 — преобразователь перемещений, P_4 — мембрана закреплена в корпусе, P_5 — связь мембраны с преобразователем перемещений, P_6 — усилитель, P_7 — связь преобразователя перемещений с усилителем. Все эти признаки есть и в прототипе, в том числе, и преобразователь перемещений, P_3 который в прототипе конкретизирован в виде соединения блоков, он задан набором признаков от выхода мембраны, до выхода усилителя. Это следующая часть формулы прототипа: скрепленный с

мембраной чувствительный элемент автогенератора, генератор эталонной частоты с блоком сравнения, причем входы блока сравнения соединены с выходами автогенератора и генератора эталонной частоты, а выход блока сравнения соединен с усилителем. Часть формулы фактически является описанием конструкции прототипа от выхода мембраны до выхода усилителя. Поэтому эти признаки нумеровать не будем, они все войдут в P_3 . В новом изобретении эта часть конструкции защищена более широким понятием „преобразователь перемещения в выход усилителя“, который не обязательно может быть выполнен в виде частотного преобразователя, как в прототипе.

Пронумеруем оставшиеся признаки прототипа, которые не вошли в ограничительную часть нового решения [21]: P_8 — регистратор, P_9 — связь регистратора с усилителем, P_{10} — выход усилителя соединен с мембраной, P_{11} — связь усилителя с мембраной гальваническая, P_{12} — мембрана, выполнена в виде биморфного элемента.

На основании бинарных отношений признаков составим структурную схему формулы изобретения прототипа (рис. 3, а). Штриховой линией обведены признаки, общие для прототипа и нового решения, т.е. признаки ограничительной части.

Пронумеруем новые признаки, входящие в отличительную часть формулы изобретения прототипа: N_1 — нагревательный элемент, N_2 — установка нагревательного элемента на мембране, N_3 — подключение нагревательного элемента к выходу усилителя, N_4 — выполнение мембраны из металла с деформационной памятью. Структурная схема формулы изобретения нового решения приведена на рис. 3, б, признаки ограничительной части обведены штриховой линией.

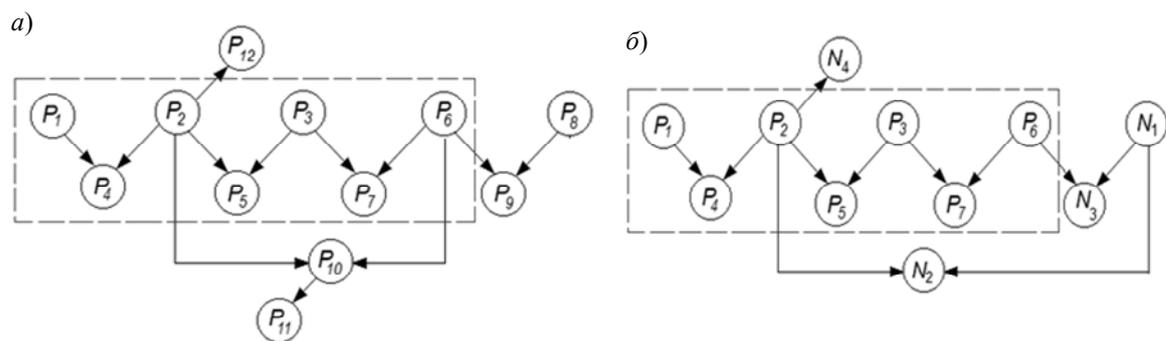


Рис. 3

По формулам (4)—(6) найдем численное значение F силы структур:

$$F(A \cap B) = \sum_{i=1}^7 F_i = (3 - 0,5) + (3 - 4 \cdot 0,5) + (3 - 2 \cdot 0,5) + 2 + 2 + (3 - 2 \cdot 0,5) = 11,5;$$

$$F(A - B) = \sum_{i=8}^{12} F_i = 3 + 2 + (2 - 0,5) + 1 + 1 = 7,0;$$

$$F(B - A) = \sum_{j=1}^4 F_j = (3 - 2 \cdot 0,5) + 2 + 2 + 1 = 8,5.$$

Далее по (3) находим степень нарушения симметрии

$$E = 11,5 / (11,5 + 7,0 + 8,5) = 0,426.$$

Расчет степени асимметрии по информационно-энергетической схеме. ИЭС датчика для нового решения (рис. 4) составляется на основе описания физического принципа действия устройства и конструкции (рис. 2, а).

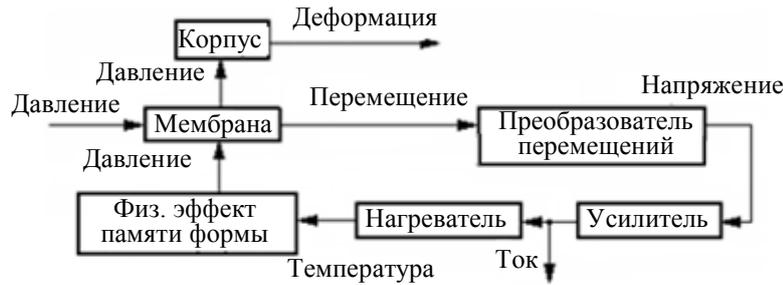


Рис. 4

Запишем размерности входных и выходных физических величин блоков схемы в системе Бартини: давление L^2T^{-4} , перемещение L^1T^0 , напряжение L^2T^{-2} , ток L^3T^{-3} , температура L^5T^{-4} , деформация L^1T^0 . Находим передаточные матрицы блоков как произведения выходных матриц на матрицы, обратные входным. Например, для мембраны входная, выходная и передаточная матрицы W имеют вид:

$$P = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix}, W_3 = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix},$$

где P — входная матрица (давление), S — выходная матрица (перемещение). Передаточные матрицы W_i остальных элементов рассчитаны аналогично и приведены на схеме имитационного моделирования размерностей (рис. 5) внутри соответствующих блоков. Произведение передаточных матриц замкнутого контура должно быть равно единичной матрице. Это условие применяется для проверки корректности составления схемы.

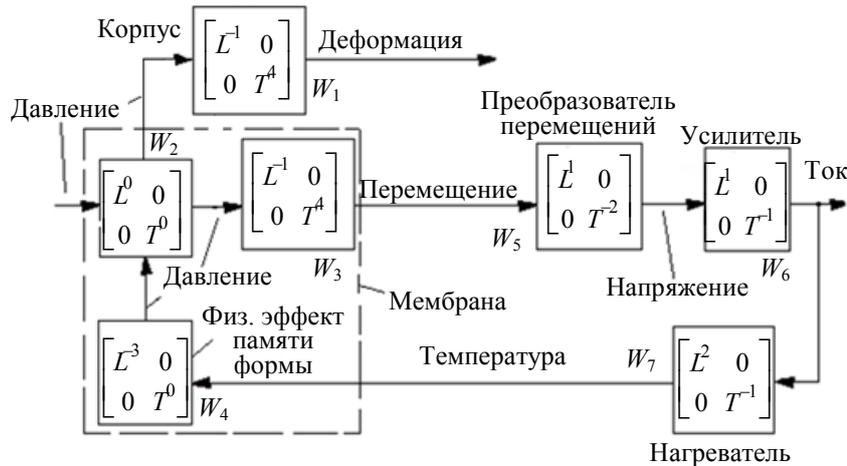


Рис. 5

ИЭС датчика для прототипа (рис. 6) составляется на основе описания физического принципа действия устройства и конструкции (рис. 2, б).



Рис. 6

На основании ИЭС прототипа находим передаточные матрицы элементов схемы аналогично передаточным матрицам для нового решения. Размерности частоты и натяжения в ба-

зисе Бартини равны L^0T^{-1} и L^3T^{-4} соответственно. Схема имитационного моделирования размерностей представлена на рис. 7.

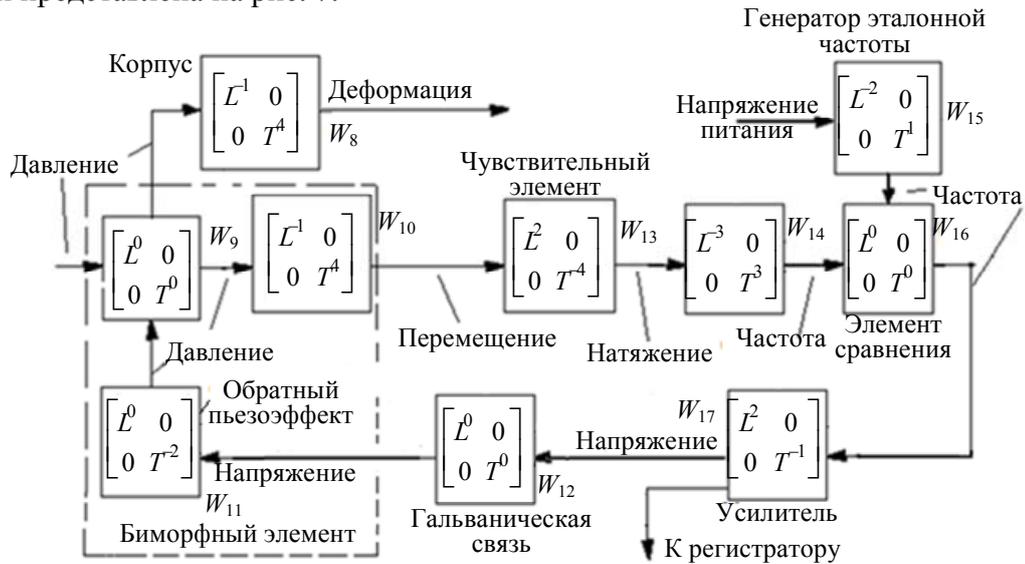


Рис. 7

Сравнивая схемы имитационного моделирования для нового решения и прототипа, находим симметричную часть, т.е. блоки с одинаковыми передаточными матрицами и взаимными связями: $W_1=W_8$, $W_2=W_9$, $W_3=W_{10}$. За этими матрицами стоят следующие признаки — корпус, в котором установлена мембрана с входом по измеряемому давлению и выходом по перемещению мембраны. Все они входят в ограничительную часть нового решения [21], т.е. принадлежат и прототипу [22]. Кроме того, в ограничительную часть входит и блок с матрицей W_5 — преобразователь перемещений. Он присутствует и в новом решении, и в прототипе, только в прототипе он представлен в виде конкретной реализации из блоков с матрицами $W_{13}, W_{14}, W_{15}, W_{16}, W_{17}$. Учитывается их совокупность, математически — произведение, которое и дает $W_5 = W_{13}W_{14}W_{16}W_{17}$. По отдельности матрицы входят в формулу только прототипа, куда также добавляется генератор эталонной частоты W_{15} . Ресурсоемкость R_i блока с передаточной матрицей $W_i = \begin{bmatrix} L^m & 0 \\ 0 & T^n \end{bmatrix}$ находим по формуле $R_i = \sqrt{m^2 + n^2}$. Далее рассчитываем функцию соответствия:

$$F(A \cap B) = R_1 + R_2 + R_3 + R_5 = \sqrt{(-1)^2 + 4^2} + \sqrt{0^2 + 0^2} + \sqrt{(-1)^2 + 4^2} + \sqrt{1^2 + (-2)^2} = 10,482.$$

Кроме блоков преобразователя перемещения в прототип входят блоки с матрицами W_{11} — обратный пьезоэффект биморфа, и W_{12} — гальваническая связь. Следовательно, функция соответствия для прототипа равна

$$\begin{aligned} F(A - B) &= R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} + R_{17} - R_5 + R_{11} + R_{12} = \\ &= \sqrt{2^2 + (-4)^2} + \sqrt{(-3)^2 + 3^2} + \sqrt{(-2)^2 + 1^2} + \sqrt{0^2 + 0^2} + \\ &+ \sqrt{2^2 + (-1)^2} - \sqrt{1^2 + (-2)^2} + \sqrt{0^2 + (-2)^2} + \sqrt{0^2 + 0^2} = 12,951. \end{aligned}$$

Ресурсоемкость R_5 вычитается, так как она уже учтена в $R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16}$.

В отличительную часть нового решения входят блоки с матрицами W_4, W_6, W_7 . Следовательно, функция соответствия равна

$$F(B - A) = R_4 + R_6 + R_7 = \sqrt{(-3)^2 + 0^2} + \sqrt{1^2 + (-1)^2} + \sqrt{2^2 + (-1)^2} = 6,650.$$

Далее по (3) находим степень нарушения симметрии

$$E = 10,482 / (10,482 + 12,951 + 6,650) = 0,348.$$

Расчет некоторых показателей качества. Определим коэффициент новизны K_n по формуле $K_n = 1 - E$, для оценки по структуре патентной формулы $K_n = 1 - 0,426 = 0,574$, для оценки по ИЭС $K_n = 1 - 0,348 = 0,652$. Как видно, оценки близки (разница примерно 12 %), что позволяет судить о достоверности методики. Чем выше коэффициент новизны, тем более новым является техническое решение, по сравнению с прототипом. Максимальная новизна соответствует идеальному решению $K_n = 1$, однако оно недостижимо. Близким к идеальному является так называемое пионерное изобретение, которое не имеет прототипа. В ограничительной части пионерного изобретения имеется только один признак — его название, которое не несет информации о конструкции устройства, а только задает его функцию. Например, „датчик давления, отличающийся тем, что...“, а далее следуют признаки отличительной части, позволяющие воспроизвести устройство.

По ИЭС определим коэффициент изменения затрат ресурсов K_3 для решения изобретательской задачи как отношение затрат ресурсов пространства и времени нового решения к затратам для прототипа:

$$K_3 = [F(A \cap B) + F(B - A)] / [F(A \cap B) + F(A - B)] = (10,482 + 6,650) / (10,482 + 12,951) = 0,731.$$

При $K_3 = 1$ затраты ресурсов одинаковы, при $K_3 < 1$ затраты ресурсов в новом решении меньше, чем в прототипе, при $K_3 > 1$ больше.

Наглядно изменение мощности затрат ресурсов можно представить диаграммой (рис. 8, a — новое решение, b — прототип).

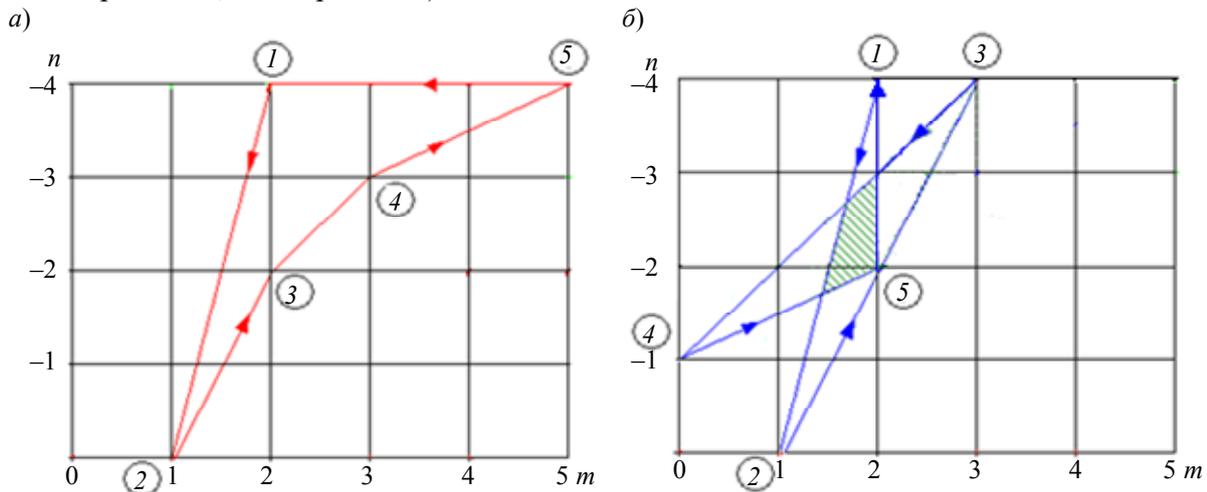


Рис. 8

Диаграмма строится на плоскости координат системы Бартини, где по оси абсцисс откладывается показатель степени m в размерности длины L^m , по оси ординат — показатель степени n в размерности времени T^n . Для построения используем схему имитационного моделирования размерностей (рис. 5 и 7). Например, для нового решения начинаем строить диаграмму из начала координат (точка 1 на рис. 8, a), строя вектор входной величины — давления до точки 2 с координатами $n = 2, m = -4$, так как давление имеет размерность L^2T^{-4} . Следующей величиной на рис. 6, после преобразования в W_3 , является перемещение, вектор которого начинается в начале координат 1 и оканчивается в точке 3 на рис. 8, a . Поэтому проводим линию из точки 2 в точку 3 и так далее. Таким образом, линия преобразования давление → перемещение → напряжение → ток → температура → давление геометрически представляется ломаной $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 1$, образующей многоугольник площадью $3,5 \text{ м} \times \text{с}$. В системе Бартини физическая величина с такой размерностью называется длительностью расстояния и может рассматриваться как оценка затрат мощности ресурсов пространства и времени, необходимых для описания формулы изобретения в виде ИЭС.

Для прототипа диаграмма (рис. 8, б) строится аналогично, в виде линии через точки $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 1$, отражающей процесс преобразования давление \rightarrow перемещение \rightarrow натяжение \rightarrow частота \rightarrow напряжение \rightarrow давление. Как следует из рисунка, диаграмма мощности затрат для прототипа состоит из двух треугольников: первый — с вершинами 1, 2, 5 и площадью $1,0 \text{ м} \times \text{с}$, второй — с вершинами 3, 4, 5 и с площадью $1,5 \text{ м} \times \text{с}$, частично наложенный на первый треугольник. Наложённая часть на рис. 8, б заштрихована, она имеет площадь $0,4 \text{ м} \times \text{с}$ и означает избыточность мощности затрат на формулу изобретения прототипа.

Таким образом, новое решение требует меньше ресурсов, но оно мощней прототипа.

Заключение. Предложенная методика численной оценки новизны пригодна не только для патентов, но и других видов описания технических систем, в которых приводится информация о физическом принципе действия. Ограничения касаются только информации численного характера, т.е. в случае датчика давления неизвестны величина, диапазон, скорость изменения измеряемого давления, другие численные характеристики, например, коэффициент усиления усилителя или величина выходного напряжения и т.п. Заданные численные значения ограничивают выбор принципа действия, например, заставляют выбирать вместо мембранного типа пьезодатчик давления.

Методика предполагает, что в патенте защищается конструкция, а не химический состав вещества как, например, в фармакологии, или физический состав, как в сплавах.

Оценка мощности затрат пространства и времени возможна только для замкнутых контуров в ИЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuejun He and Jianxi Luo. The novelty „sweet spot“ of invention. Cambridge University Press, 07 November 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.23>.
2. Dongwook Hwang and Kristin Lee Woo. Assessing the Novelty of Design Outcomes: Using a Perceptual Kernel in a Crowd-sourced Setting // Design Computing and Cognition DCC'20. Springer, 2020. P. 411—422. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90625-2_24.
3. Fiorineschi L., Frillici F. S. & Rotini F. Refined metric for a-posteriori novelty assessments // Journal of Engineering Design. 2021. Vol. 33, N 03. P. 1—25. DOI:10.1080/09544828.2021.1976397.
4. Сибиряков В. Г. Прогнозирование тенденций развития технических систем как основа инновационной деятельности // Докл. на III Междунар. форуме-фестивале "Интеллектуальная собственность для будущего. IPfF-2022. СПб, 21 апреля 2022 г. [Электронный ресурс]: <<https://ipforfuture.com/presentations2022>>.
5. Альтишуллер Г. С. Найти идею: Введение в ТРИЗ — теорию решения изобретательских задач. М.: Альпина-Бизнес-Букс, 2007. 400 с.
6. Rothenberg A. The emerging goddess: the creative process in art, science, and other fields // Journal of Aesthetics and Art Criticism. 1980. Vol. 39, N 2. P. 206—209.
7. Горский Ю. М. Основы гомеостатики. Гармония и дисгармония в живых, природных, социальных и искусственных системах. Иркутск: ИГЭА, 1998. 337 с.
8. Повилейко Р. П. Симметрия в технике. Новосибирск: Новосибирский электротехнический институт (НЭТИ), 1970. 130 с.
9. Бушуев А. Б., Бажин В. Ю., Литвинов Ю. В., Петров В. А., Мансурова О. К. Биологическая модель поиска решения изобретательской задачи // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 851—859. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-851-859.
10. Shannon C. E. A Mathematical theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379—423.
11. Глушков В. М. О кибернетике как науке // Кибернетика, мышление, жизнь / Под ред. А. И. Берга и др. М.: Мысль, 1964. 511 с.
12. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 344 с

13. Tversky A. Features of Similarity // Psychological Review. Jerusalem, Israel: Hebrew University, 1977. Vol. 84, N 4. P. 327—352.
14. Brown D. C. A Brief Review of Approaches to Design Novelty Assessment. Computer Science Technical Report Series. Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts 01609-2280. January 14, 2021.
15. Ткалич В. Л., Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Коробейников А. Г., Симоненко З. Г., Монахов Ю. С. Патентование и защита интеллектуальной собственности. СПб: Университет ИТМО, 2015. 171 с.
16. Бушуев А. Б. Применение методов технического творчества в инновационной деятельности. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 124 с.
17. Половинкин А. И. Основы инженерного творчества. СПб: Лань, 2022. 364 с.
18. Litvinov Y. V., Bushuev A. B., Litvinov E. Y. Graphic Synthesis of the Operating Physical Principle of Control and Measuring Devices // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2021). 2021. P. 9470754.
19. Бартини Р. О., Кузнецов П. Г. О множественности геометрий и множественности физик // Проблемы и особенности современной научной методологии. Свердловск: АН СССР, Урал. науч. центр, 1978. С. 55—65.
20. Бушуев А. Б. Численная оценка информационно-энергетических схем измерительных устройств // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 3—7. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-9-3-7.
21. А.с. СССР № 1472773. Датчик давления / А. С. Блайвас, Н. В. Филиппова, А. П. Штыков. 24.08.1987.
22. А.с. СССР № 885844. Датчик давления / Г. С. Алексеев, Р. И. Королева, В. А. Павленко, А. Б. Релин, В. Е. Сенкевич, Ю. А. Турицын. 30.11.1981.

Сведения об авторах

- Александр Борисович Бушуев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: bushuev@inbox.ru
- Наталья Александровна Дударенко** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: dudarenko@mail.ifmo.ru
- Юрий Володарович Литвинов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт информационных технологий в электромеханике и робототехнике; E-mail: yurl13@yandex.ru
- Ольга Карибековна Мансурова** — канд. техн. наук, доцент; Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“, кафедра автоматизации технологических процессов и производств; E-mail: Mansurova_OK@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 07.06.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. Yuejun He and Jianxi Luo, *The novelty 'sweet spot' of invention*, Cambridge University Press, 07 November 2017, DOI: <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.23>.
2. Dongwook Hwang and Kristin Lee Woo, *Design Computing and Cognition DCC'20*, Springer, 2020, pp. 411–422, https://doi.org/10.1007/978-3-030-90625-2_24.
3. Fiorineschi L., Frillici F.S. & Rotini F. *Journal of Engineering*, 2021, no. 03(33), pp. 1–25, DOI: 10.1080/09544828.2021.1976397.
4. Sibiriyakov V.G. *Intellektual'naya sobstvennost' dlya budushchego. IPfF-2022 (Intellectual Property for the Future. IPfF-2022)*, Report at the III International Forum-Festival, St. Petersburg, April 21, 2022. (in Russ.)
5. Al'tshuller G.S. *Nayti ideyu: Vvedeniye v TRIZ – teoriyu resheniya izobretatel'skikh zadach (Find an Idea: Introduction to TRIZ – Theory of Inventive Problem Solving)*, Moscow, 2007, 400 p. (in Russ.)
6. Rothenberg A. *Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 1980, no. 2(39), pp. 206–209.
7. Gorskiy Yu.M. *Osnovy gomeostatiki. Garmoniya i disgarmoniya v zhivyykh, prirodnykh, sotsial'nykh i iskusstvennykh sistemakh (The Basics of Homeostatics. Harmony and Disharmony in Living, Natural, Social and Artificial Systems)*, Irkutsk, 1998, 337 p. (in Russ.)
8. Povileyko R.P. *Simmetriya v tekhnike (Symmetry in Engineering)*, Novosibirsk, 1970, 130 p. (in Russ.)
9. Bushuev A.B., Bazhin V.Yu., Litvinov Yu.V., Petrov V.A., Mansurova O.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 9(62), pp. 851–859, DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-851-859. (in Russ.)
10. Shannon C.E. *Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, pp. 379–423.
11. Glushkov V.M. *O kibernetike kak nauke, V sb. Kibernetika, myshleniye, zhizn' (On Cybernetics as a Science, In Sat. Cybernetics, Thinking, Life)*, Moscow, 1964, 511 p. (in Russ.)
12. Nicolis G., Prigogine I. *Exploring Complexity*, St. Martin's Press, 1989, 328 p.

13. Tversky A. *Psychological Review*, Hebrew University, Jerusalem, Israel, 1977, no. 4(84), pp. 327–352.
14. Brown D.C. *A Brief Review of Approaches to Design Novelty Assessment*. Computer Science Technical Report Series, Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts 01609-2280, January 14, 2021.
15. Tkalich V.L., Labkovskaya R.Ya., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G., Simonenko Z.G., Monakhov Yu. S. *Patentovedeniye i zashchita intellektual'noy sobstvennosti* (Patenting and Protection of Intellectual Property), St. Petersburg, 2015, 171 p. (in Russ.)
16. Bushuev A.B. *Primeneniye metodov tekhnicheskogo tvorchestva v innovatsionnoy deyatel'nosti* (Application of the Methods of Technical Creativity in Innovation, 2010, 124 p. (in Russ.)
17. Polovinkin A.I. *Osnovy inzhenerenogo tvorchestva* (Fundamentals of Engineering Creativity), St. Petersburg, 2022, 364 p. (in Russ.)
18. Litvinov Y.V., Bushuev A.B., Litvinov E.Y. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2021)*, 2021, pp. 9470754.
19. Bartini R.O., Kuznetsov P.G. *O mnozhestvennosti geometriy i mnozhestvennosti fizik. Problemy i osobennosti sovremennoy nauchnoy metodologii* (On the Multiplicity of Geometries and the Multiplicity of Physicists. Problems and Features of Modern Scientific Methodology), Sverdlovsk, 1978, pp. 55–65. (in Russ.)
20. Bushuev A.B. *Measurement Techniques*, 2017, no. 9(60), pp. 857–862.
21. Certificate of authorship USSR 1472773, *Datchik davleniya* (Pressure Sensor), A.S. Blaivas, N.V. Filippova, A.P. Shtykov, 24.08.1987. (in Russ.)
22. Certificate of authorship USSR 885844, *Datchik davleniya* (Pressure Sensor), G.S. Alekseev, R.I. Koroleva, V.A. Pavlenko, A.B. Relin, V.E. Senkevich, Yu.A. Turitsyn, 30.11.1981. (in Russ.)

Data on authors

Alexander B. Bushuev	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: bushuev@inbox.ru
Natalia A. Dudarenko	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: dudarenko@mail.ifmo.ru
Yury V. Litvinov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Information Technologies in Electromechanics and Robotics; E-mail: yur13@yandex.ru
Olga K. Mansurova	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg Mining University, Department of Automation of Technological Processes and Production; E-mail: Mansurova_OK@pers.spmi.ru

Received 07.06.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 31.10.2022.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF NOTES

УДК 004.942

DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-916-919

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Б. В. СОКОЛОВ*, В. В. ЗАХАРОВ Д. В.

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
sokolov_boris@inbox.ru

Аннотация. В текущих условиях одним из перспективных направлений исследований в информационно-технологической сфере является создание и повсеместное применение интегрированных систем поддержки принятия решений при проактивном (упреждающем) управлении сложными объектами (СлО) на базе комплексного согласованного использования цифровых двойников (ЦД) указанных объектов и ЦД, описывающих процесс реализации этапов их жизненного цикла. В рамках подобного подхода, как показывает анализ, удается находить оптимальные (эталонные) параметры, программы и законы проактивного управления СлО, робастность и устойчивость которых можно гарантированно проверить и обеспечить с помощью данных ЦД. К настоящему времени разработано большое количество ЦД объектов и процессов для различных предметных областей. Однако процессы создания и использования ЦД СлО синтезируются в большинстве случаев на эвристической базе из-за отсутствия соответствующих научных основ. Показано, как, используя системно-кибернетическую интерпретацию процессов управления жизненным циклом ЦД СлО, можно сформировать методологические основы соответствующей теории. Описаны методология и технологии создания и использования ЦД СлО применительно к распределенным комплексам киберфизических систем.

Ключевые слова: киберфизические системы, цифровые двойники и нити, разработка и использование цифровых двойников, управление параметрами и структурами цифровых двойников

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00301.

Ссылка для цитирования: Соколов Б. В., Захаров В. В. Методологические основы создания и использования цифровых двойников сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 916—919. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-916-919.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE CREATION AND USE OF DIGITAL TWINS OF COMPLEX OBJECTS

B. V. Sokolov*, V. V. Zakharov

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
sokolov_boris@inbox.ru

Abstract. In the current conditions, one of the promising areas of research in the IT-domain is the creation and widespread use of integrated decision support systems for proactive management of complex objects based on the integrated coordinated use of digital twins of these objects describing the process of implementing the stages of their life cycle. According to presented analysis, within the framework of such an approach it is possible to find optimal (reference) parameters, programs, and laws of practical management of the complex object, and it may be guaranteed that their robustness and stability can be checked and ensured using data from the digital twin. To date, a large number of digital objects and processes have been developed for various subject areas. However, the processes of creating and using the digital twins of complex objects are synthesized in most cases on a heuristic basis due to the lack of appropriate scientific foundations. It is shown how, using the system-cybernetic interpretation of the processes of managing the

life cycle of the digital twin of complex object, it is possible to form a methodological foundation of the corresponding theory. The methodology and technologies for the creation and use of digital twins of complex objects with respect to distributed complexes of cyber-physical systems are described.

Keywords: cyber-physical systems, digital twins and threads, development and use of digital twins, control of parameters and structures of digital twins

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-00301.

For citation: Sokolov B. V., Zakharov V. V. Methodological foundations for the creation and use of digital twins of complex objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 916—919 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-916-919.

Введение. Согласно ГОСТ 57700.37–2021, цифровой двойник (ЦД) — это система, состоящая из цифровой модели изделия и *двусторонних связей* с изделием и (или) его составными частями* К настоящему времени развитие парадигмы Индустрии 4.0 предопределило многовариантность сфер их применения: ситуативное планирование ремонта и сервисного технического обслуживания элементов и подсистем сложных объектов (СЛО); прогнозирование и парирование расчетных и нерасчетных сбоев и отказов в них; планирование процессов функционирования киберфизических систем (КФС), а также территориально распределенное управление ими; решение различных прикладных задач потребителей на различных стадиях жизненного цикла (ЖЦ) и т.д. [1].

Анализ литературы показывает, что в настоящий момент времени объектами исследований многих научных групп являются разнообразные структуры унифицированных типовых модулей ЦД, которые могут быть использованы при их разработке. Так, например, компания Siemens, говоря о ЦД, выделяет ЦД производимого (эксплуатируемого) продукта (СЛО), ЦД производственного процесса, ЦД процесса эксплуатации, использующего данные как о реальном продукте, так и о реальных процессах. Комбинация и интеграция всех трех ЦД, когда они развиваются вместе, называется цифровой нитью (ЦН) [2]. Термин (концепт) „нить“ используется для того, чтобы показать, как с его помощью обеспечиваются объединение и интеграция всех данных, информации и знаний о СЛО и его ЦД на всех этапах их ЖЦ. В множестве современных работ описываются фреймворки для создания ЦД, однако предлагаемые решения не имеют необходимого научного обоснования и являются набором практических (эвристических) рекомендаций [1, 2]. Существенно подчеркнуть: несмотря на хорошие перспективы применения ЦД, некоторые авторы указывают на ограничения данного подхода. К ним относятся: отсутствие *убедительных* примеров, показывающих на практике эффект от *использования* ЦД; сложность единообразного математического описания материальных и информационных процессов, протекающих в КФС на различных этапах ЖЦ. Во многом, по нашему мнению, это связано, во-первых, с тем, что операции, связанные с функционированием КФС и их ЦД, имеют в большинстве случаев не детерминированный, а вероятностно-стохастический и/или нечетко-возможностный характер, а, во-вторых, структуры КФС (ЦД) (техническая, информационная, топологическая и т.д.), как показывает практика, динамичны и изменчивы (наблюдается структурная динамика) [3, 4].

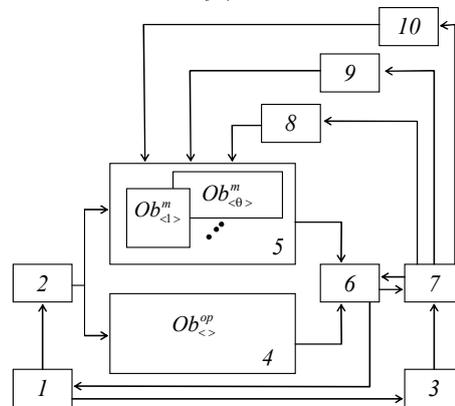
Таким образом, в текущих условиях особую значимость приобретает научная задача разработки прикладной теории синтеза технологий и программ управления созданием и функционированием ЦД, и ее применения для решения задач системного моделирования и управления КФС в целях повышения качества их функционирования на различных этапах ЖЦ.

Методологические основы создания и использования ЦД. Всесторонний анализ подходов к формированию прикладной теории ЦД показал, что в качестве ее научных основ следует принять фундаментальные и прикладные результаты, полученные в теории проактивного управления структурной динамикой СЛО, а также теории многокритериального оценивания

* ГОСТ Р 57700.37-2021.. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий.

качества моделей и полимодельных комплексов (ПМК) (квалиметрия моделей и ПМК) [3, 4]. При этом базовыми для теории ЦД должны быть концепции комплексного предсказательного моделирования, проактивного принятия решений, интеллектуализации управления. В качестве основного объекта исследования теории должен быть выбран не ЦД, а развивающаяся ситуация (РС), описывающая субъекта либо субъектов ($S_{<>}^m$), в чьих интересах создается ЦД, объект-оригинал ($Ob_{<>}^{op}$) — в нашем случае это некоторый СлО, объект-модель, или сам ЦД, а также среду ($CP_{<>}^m$), которая посредством внешних и/или внутренних возмущающих воздействий оказывает влияние на СлО и его ЦД; и помимо того, бинарные отношения между перечисленными элементами [4]. Так как процесс создания и использования ЦД (процесс моделирования) является целенаправленным, то авторы статьи предлагают рассматривать его с системно-кибернетических позиций, а само моделирование описывать в терминах теории проактивного управления РС.

На рисунке представлена обобщенная технология реализации данного вида управления [4]. На рисунке приняты следующие условные обозначения: 1 — формирование целей функционирования $Ob_{<>}^{op}$; 2 — формирование входных воздействий; 3 — формирование целей моделирования создания и использования ЦД; 4 — моделируемая система (объект $Ob_{<>}^{op}$); 5 — модели ($Ob_{<0>}^m$) — ЦД — исследуемой системы $Ob_{<>}^{op}$; 6 — оценивание и анализ качества ЦД (полимодельных комплексов ЦД) на основе сбора и обработки данных и информации, получаемых от $Ob_{<>}^{op}$ и $Ob_{<0>}^m$; 7 — управление качеством ЦД и процессами моделирования на основе решения задач в блоке 6; 8 — управление параметрами ЦД; 9 — управление структурами ЦД; 10 — изменение концепции описания ЦД.



В целом каждый вариант реализации той или иной технологии создания и использования ЦД СлО характеризуется своими затратами времени на моделирование, расходом различных видов ресурсов и, наконец, своими конечными результатами (эффектами). В этих условиях большой интерес представляют вопросы оценивания и выбора наилучших (в некотором смысле) вариантов технологий синтеза ЦД. Можно использовать результаты современной теории эффективности целенаправленных процессов на конструктивном уровне для оценивания, анализа и многокритериального выбора наиболее предпочтительных технологий создания и использования ЦД СлО с точки зрения их результативности, ресурсоемкости, оперативности [5—8].

Заключение. В статье показано, что на каждом этапе жизненного цикла киберфизических систем и их цифровых двойников остро необходима теория, которая позволила бы перейти от широко использующихся на практике эвристических рекомендаций, дорожных карт и фреймворков к формально обоснованным подходам и системным инструментам, которые позволят управлять созданием и использованием цифрового двойника сложного объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges // Intern. Symp. on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). Orlando, FL, USA, 6 May 2008. P. 245—257.
2. What is a digital twin? [Электронный ресурс]: <<https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>>. (28.05.2020).
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные информационные технологии управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 408 с.
4. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
5. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 тт. / Под ред. Б. С. Авдеевского и др. М.: Машиностроение, 1988. Т. 3.
6. Correa F. R. Cyber-physical systems for construction industry // 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). St. Petersburg, 2018. P. 392—397.
7. Tomiyama T., Moyan F. Resilient architecture for cyber-physical production systems // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2018. Vol. 67, N 1. P. 161—164.
8. Соколов Б. В., Ковалев А. П., Мустафин Н. Г., Захаров В. В., Щербакова Е. Е. Методологические основы проактивного управления социоконвергентными системами // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 12. С. 1018—1021.

Сведения об авторах

Борис Владимирович Соколов

— д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Валерий Вячеславович Захаров

— канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ст. научный сотрудник; E-mail: valeriov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. Lee E.A. *International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, May 6, 2008, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 245–257.
2. *What is a digital twin?*, <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>.
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye informatsionnyye tekhnologii upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Information Technologies for Managing the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 408 p. (in Russ.)
4. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov* (Qualimetry of Models and Polymodel Complexes), Moscow, 2018, 314 p. (in Russ.)
5. Avduyevskiy B.S. et al., ed., *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike* (Reliability and Efficiency in Engineering), Handbook in 10 Volumes, Moscow, 1988, vol. 3. (in Russ.)
6. Correa F.R. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, St. Petersburg, 2018, pp. 392–397.
7. Tomiyama T., Moyan F. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2018, no. 1(67), pp. 161–164.
8. Sokolov B.V., Kovalev A.P., Mustafin N.G., Zakharov V.V., Shcherbakova E.E. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 12(64), pp. 1018–1021. (in Russ.)

Data on authors

Boris V. Sokolov

— Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Valery V. Zakharov

— PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Senior Researcher; E-mail: valeriov@yandex.ru

Received 30.08.2022; approved after reviewing 12.09.2022; accepted for publication 31.10.2022.

**ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ФАКТОРНОГО ПРОСТРАНСТВА
ПРИ ОЦЕНИВАНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА**А. В. СПЕСИВЦЕВ^{*1}, А. Н. ПАВЛОВ^{1,2}¹*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия*** sav2050@gmail.com*²*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Моделирование сложных объектов (СЛО) всегда сопряжено с решением проблем не только методологического, но и методического характера. К ним относится, например, проблема формирования и использования факторного пространства (ФП) при решении задачи оценивания и прогнозирования состояния СЛО. В рамках постановки задачи сформулированы основные правила, которыми должен пользоваться эксперт при выборе ФП для синтеза различных классов моделей, в том числе на примере построения нечетко-возможностной модели СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний. Рассмотрен пример построения ФП и соответствующей модели для одного и того же технологического процесса, связанного с твердофазным обжигом сульфидного концентрата, с использованием двух принципиально различных подходов к описанию данного процесса: классического балансового и нечетко-возможностного подхода. На практическом примере показано, что обоснованный выбор состава и структуры ФП, в особенности зависимых переменных (выходных параметров), играет важную роль в достижении желаемого результата — построении модели оценивания и прогнозирования состояния СЛО, которая с требуемой степенью адекватности описывает исследуемый процесс.

Ключевые слова: факторное пространство, явные и неявные экспертные знания, нечетко-возможностный подход и модель, количественные и качественные параметры и переменные, сложный объект и процесс

Благодарности: работа проводилась при финансовой поддержке в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Спесивцев А. В., Павлов А. Н. Особенности выбора факторного пространства при оценивании и прогнозировании состояния сложного объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 920—924. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-920-924.

**FEATURES OF THE CHOICE OF FACTOR SPACE IN THE ESTIMATION AND PREDICTION
OF THE STATE OF A COMPLEX OBJECT**A. V. Spesivtsev^{*1}, A. N. Pavlov²¹*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia*** sav2050@gmail.com*²*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia*

Abstract. Modeling of complex objects is always associated with the solution of problems not only of a methodological, but also of a methodical nature. Such problems include, for example, the problem of the formation and use of the factor space in solving the problem of estimating and predicting the state of the complex object. As part of the problem statement, the main rules are formulated that an expert should use when choosing a factor space for the synthesis of various classes of models, including the example of constructing a fuzzy-possibility model of complex object based on explicit and implicit expert knowledge. An example of constructing a factor space and the corresponding model for a technological process associated with solid-phase roasting of a sulfide concentrate is considered using two fundamentally different approaches to describing this process. These approaches are the classical balance approach and fuzzy-possible approach. On a practical example, it is shown that a reasonable choice of the factor space composition and structure, especially dependent variables (output parameters), plays an important role in achieving the desired result - building a model for estimating and predicting the state of the complex object, which describes the process under study with the required degree of adequacy.

Keywords: factor space, explicit and implicit expert knowledge, fuzzy-possibility approach and model, quantitative and qualitative parameters and variables, complex object and process

Acknowledgment: the work was carried out with financial support under the budget topic FFZF-2022-0004.

For citation: Spesivtsev A. V., Pavlov A. N. Features of the choice of factor space in the estimation and prediction of the state of a complex object. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 920—924 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-920-924.

Введение. К настоящему времени разработан и в различных предметных областях (ПрО) на практике успешно применяется метод построения нечетко-возможностной модели (НВМ) при решении задач оценивания состояния сложных объектов (СЛО) с использованием явных и неявных знаний и опыта эксперта [1, 2]. При этом, как показывает анализ, выбор факторного пространства (ФП) при постановке и решении указанного класса задач достаточно произволен, что объясняется, с одной стороны, трудностью формализации конкретных правил выбора данного пространства, а с другой — зависимостью от компетентности и опыта конкретного эксперта-исследователя.

В связи со сказанным становятся весьма актуальными вопросы обобщения и структуризации накопленного опыта в формировании указанных ФП в виде ряда основных положений. Исследователю при решении задач описания (моделирования) и оценивания состояния СЛО в слабоструктурированных ПрО целесообразно придерживаться следующих правил:

— на основе технической документации и результатов эксплуатации СЛО сформировать наиболее полный список измеряемых и неизменяемых (неколичественных, лингвистических, вербальных) параметров (внутренних, внешних, объективных, субъективных), существенно влияющих на состояние рассматриваемого объекта, часть из которых впоследствии должна войти в ФП [1, 3];

— выделенные параметры и соответствующие переменные ФП должны позволить исследователю описывать и рассматривать СЛО с различных сторон, а также учитывать различные аспекты его функционирования;

— исходя из психолого-эргономических требований размерность ФП для синтеза НВМ следует ограничить семью факторами [1, 4];

— должен быть определен четкий физический смысл измеряемых параметров и соответствующих переменных ФП, должны быть определены единицы измерения, пределы изменения их значений, а также сформулированы требования к точности измерения значений данных параметров. Для качественных (неизменяемых) параметров должно быть проведено лингвистическое описание их смысла. При этом узкие интервалы варьирования рассматриваемых параметров (переменных) несут меньше информации о состоянии СЛО, а слишком широкие могут указывать на несущественное их влияние [2, 3];

— выбранные параметры (переменные) ФП должны быть привязаны к единой временной шкале (год, месяц, сутки, смена и др.) [2];

— зависимые (выходные) параметры (переменные), которые характеризуют состояние (обобщенное состояние) СЛО, должны описываться как комбинированные вербально-числовые величины [5];

Проиллюстрируем основные положения перечисленных рекомендаций на практическом примере, связанном с решением задач моделирования и оценивания состояния СЛО, который представляет собой сложный технологический процесс окислительного обжига сульфидных концентратов в печах кипящего слоя (КС) [6]. В примере рассмотрены два различных подхода к выбору и обоснованию ФП при построении модели оценивания состояния СЛО. К указанным подходам относятся классический балансовый подход [6] и НВП [1, 2].

В рамках этого примера будет продемонстрирована важность выбора и обоснования ФП при решении задач оценивания и прогнозирования состояния СЛО.

Балансовый подход. В одной из фундаментальных работ по твердофазному обжигу сульфидного концентрата (ТОСК) [6] отмечено, что главным параметром, по которому регулируется обжиг ТОСК в печах КС является температура кипящего слоя $t_{\text{КС}}$. Выбор температурного режима зависит от многих факторов, среди которых важнейшими признаны следующие параметры, вошедшие в состав ФП: $\Phi_{\text{вл.ш}}$ — расход влажной шихты, т/ч; $\delta_{\text{ш}}$ — степень десульфурации, %; $\Phi_{\text{д}}$ — расход дутья, м³/ч; $C_{\text{Wш}}$ — содержание влаги в шихте, %; $C_{\text{Sш}}$ — содержание серы в шихте, %; $Q_{\text{п}}$ — потери тепла через поверхность печи, ккал/ч; $Q_{\text{ор.ш}}$ — тепло, поступающее с шихтой, ккал/ч.

Балансовая модель $t_{\text{КС}}$ при этом имеет следующий вид [6]:

$$t_{\text{КС}} = \frac{4,45 \cdot \delta_{\text{ш}} (100 - C_{\text{Wш}}) C_{\text{Sш}} \cdot \Phi_{\text{вл.ш}} + Q_{\text{ор.ш}} + 6,2\Phi_{\text{д}} - 587700(C_{\text{Wш}}/100) \cdot \Phi_{\text{вл.ш}} - Q_{\text{п}}}{0,33 \cdot \Phi_{\text{д}} + \Phi_{\text{вл.ш}} + 333(C_{\text{Wш}}/100) \cdot \Phi_{\text{вл.ш}}}. \quad (1)$$

Из анализа выражения (1) можно сделать следующие выводы:

— температура в реакционной зоне КС не может служить управляющей переменной для процесса ТОСК;

— построенная на балансовой основе модель (1) в лучшем случае является лишь расчетной, а прогнозирование состояний процесса ТОСК в печи КС в предаварийных режимах не представляется возможным в принципе.

Нечетко-возможностный подход. На основе обработки явных и неявных экспертных знаний при синтезе НВМ оценивания и прогнозирования состояния процесса ТОСК в состав ФП были включены следующие переменные [2, 7]: X_1 — скорость подачи концентрата, т/ч; X_2 — скорость подачи пыли, т/ч; X_3 — температура в реакционной зоне, °С; X_4 — скорость изменения (градиент) температуры, °С/мин; X_5 — разброс величины давления в рабочей камере, мм водяного столбца; X_6 — время отслеживания процесса от момента предыдущего управляющего воздействия, мин; Y_1 — уставка скорости подачи концентрата, т/ч. Таким образом, предложенное в рамках разработанного нечетко-возможностного подхода (НВП) ФП, содержит переменные, которые всесторонне (интегративно) описывают сложный технологический процесс окислительного обжига сульфидных концентратов в печах кипящего слоя.

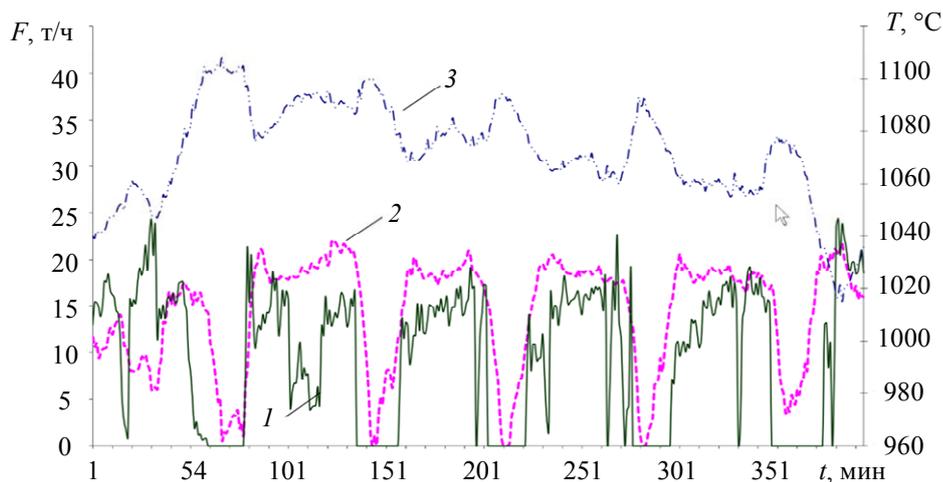
После заполнения экспертом опросной матрицы полного факторного эксперимента и проведения соответствующих вычислительных процедур по методике НВП синтезированная НВМ принимает следующий вид [7]:

$$\begin{aligned} Y_1 = & 12,56 + 0,77x_1 + 1,31x_2 - 0,73x_1x_2 - 1,43x_6 - 1,15x_1x_6 - 2,1x_4 + \\ & + 1,83x_1x_4 - 1,24x_2x_4 - 1,19x_1x_2x_4 - 0,53x_2x_4x_6 - 0,95x_3 + 1,12x_1x_3 - \\ & - 1,72x_2x_3 - 0,72x_1x_2x_3 - 1,63x_2x_3x_6 - 1,22x_3x_4 - 1,23x_3x_4x_6 - \\ & - 0,75x_2x_5 + 0,56x_5x_6 - 0,55x_1x_5x_6 - 0,9x_3x_5. \end{aligned} \quad (2)$$

В состав выражения (2) включены члены разложения обобщенной функции, описывающей состояние уставки скорости подачи концентрата только со значимыми коэффициентами, а соответствующие переменные представлены в кодированном (стандартизованном) виде и рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} x_1 &= (X_1 - 10) / 5; \quad x_2 = (X_2 - 5) / 2; \quad x_3 = (X_3 - 1050) / 60; \\ x_4 &= (X_4 - 0) / 1,5; \quad x_5 = (X_5 - 1,5) / 0,5; \quad x_6 = (X_6 - 37,5) / 12,5. \end{aligned}$$

Сравнение расчетных, полученных на основании предложенной модели (2), и фактических значений переменной, проиллюстрировано на рисунке. Как следует из анализа рисунка, расчетные значения по загрузке концентрата F (кривая 2) правильно отслеживают логику действий оператора (I) относительно как реакции на подъем температуры в зоне печи (3), так и ведения технологического процесса в целом.



Таким образом, ведение процесса обжига на основе модели (2), отражающей знания и опыт принятия решений лучшими экспертами, демонстрирует возможности использования НВП для автоматизации решения задач оценивания и прогнозирования процессов ТОСК [7]. Предварительные исследования показали, что в этом случае возможно увеличение производительности печи твердофазного обжига сульфидного концентрата примерно на 30—35 %.

Заключение. На практическом примере показано, что обоснованный выбор состава и структуры ФП, в особенности зависимых переменных (выходных параметров), играет важную роль в достижении желаемого результата — построении модели оценивания и прогнозирования состояния СЛО, которая с требуемой степенью адекватности описывает исследуемый процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатьев М. Б., Марлей В. Е., Михайлов В. В., Спесивцев А. В.* Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний. СПб: ПОЛИТЕХ-ЭКСПРЕСС, 2018. 430 с.
2. *Спесивцев А. В.* Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 307 с.
3. *Миллс Ф.* Статистические методы. М.: Госстатиздат, 1958. 798 с.
4. *Miller G. A.* The Magical Number Seven, Plus or Minus Two // *The Psychological Review*. 1956. Vol. 63. P. 81—97.
5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. *Астафьев А. Ф., Алексеев Ю. В.* Окислительный обжиг никелевых сульфидных полупродуктов в кипящем слое. М.: Metallurgy, 1982. 175 с.
7. *Спесивцев А. В., Кимяев И. Т.* Информационная модель нечеткого логического регулятора с интеллектуализированной базой знаний // *Управление большими системами*. 2008. Вып. 21. М.: ИПУ РАН. С. 165—172.

Сведения об авторах

- Александр Васильевич Спесивцев** — д-р техн. наук, доцент; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник; E-mail: sav2050@gmail.ru
- Александр Николаевич Павлов** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, кафедра автоматизированных систем управления космических комплексов; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник; E-mail: pavlov62@list.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. Ignatiev M.B., Marley V.E., Mikhailov V.V., Spesivtsev A.V. *Modelirovaniye slaboformalizovannykh sistem na osnove yavnykh i neyavnykh ekspertnykh znaniy* (Modeling Weakly Formalized Systems Based on Explicit and Implicit Expert Knowledge), St. Petersburg, 2018, 430 p. (in Russ.)
2. Spesivtsev A.V. *Metallurgicheskiy protsess kak ob'yekt izucheniya: novyye kontseptsii, sistemnost', praktika* (Metallurgical Process as an Object of Study: New Concepts, Consistency, Practice), St. Petersburg, 2004, 307 p. (in Russ.)
3. Mills F.C. *Statistical methods*, NY, Columbia univ., 1924.
4. Miller G.A. *The Psychological Review*, 1956, vol. 63, pp. 81–97.
5. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
6. Astafiev A.F., Alekseev Yu.V. *Okislitel'nyy obzhig nikel'nykh sulfidnykh poluproduktov v kipyashchem sloye* (Oxidation Roasting of Nickel Sulphide Intermediates in a Fluidized Bed), Moscow, 1982, 175 p. (in Russ.)
7. Spesivtsev A.V., Kimyaev I.T. *Large Systems Management*, Moscow, 2008, no. 21, pp. 165–172. (in Russ.)

Data on authors

- Aleksander V. Spesivtsev** — Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: sav2050@gmail.ru
- Aleksander N. Pavlov** — Dr. Sci., Professor; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Automated Control Systems for Space Complexes; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: pavlov62@list.ru

Received 30.08.2022; approved after reviewing 16.09.2022; accepted for publication 31.10.2022.

ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПЛАНОВ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

С. А. ПОТРЯСАЕВ*¹, Е. Е. ЩЕРБАКОВА¹, Ю. В. КОНОПЛЕВ²

¹Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
*komaro2@mail.ru

²Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Создание судов представляет собой сложный многоэтапный процесс. Возникает необходимость решения задач оценивания и анализа производственного потенциала предприятия, а также синтеза технологии и планов функционирования. С точки зрения оптимального управления, это задачи оценивания управляемости сложной системы и проактивного управления ее структурной динамикой. Предложен способ решения этих задач на основе областей достижимости нестационарных детерминированных конечномерных дифференциальных динамических систем с перестраиваемой структурой. В результате решения рассматриваемых задач формируются пессимистическая и оптимистическая оценки выполнимости производственной программы, а также оптимальная технология реализации производственного плана и расписание работы оборудования судостроительного предприятия.

Ключевые слова: судостроительное предприятие, оценивание выполнимости плана, производственный потенциал предприятия, планирование работы предприятия, оптимальное планирование, структурная динамика, проактивное управление

Благодарности: исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90284/20.

Ссылка для цитирования: Потрысаев С. А., Щербакова Е. Е., Коноплев Ю. В. Программно-математическое обеспечение расчета производственных планов судостроительного предприятия // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 925—929. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-925-929.

SOFTWARE AND MATHEMATICAL SUPPORT FOR THE CALCULATION OF PRODUCTION PLANS OF A SHIPBUILDING ENTERPRISE

S. A. Potryasaev*¹, E. E. Scherbakova¹, Yu. V. Konoplev²

¹St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
*komaro2@mail.ru

²D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH,
St. Petersburg, Russia

Abstract. The creation of ships is a complex multi-stage process. There is a need to solve the problems of assessing and analyzing the production potential of the enterprise, as well as the synthesis of technology and operation plans. From the point of view of optimal control, these are problems of assessing the controllability of a complex system and proactive control of its structural dynamics. A method for solving these problems is proposed based on reachability domains for non-stationary deterministic finite-dimensional differential dynamical systems with a tunable structure. As a result of solving the problems under consideration, pessimistic and optimistic estimates of the feasibility of the production program are formed, as well as the optimal technology for implementing the production plan and the work schedule of the equipment of the shipbuilding enterprise.

Keywords: shipbuilding enterprise, plan feasibility assessment, enterprise production potential, enterprise work planning, optimal planning, structural dynamics, proactive management

Acknowledgment: the studies performed on this topic were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-38-90284/20.

For citation: Potryasaev S. A., Scherbakova E. E., Konoplev Yu. V. Software and mathematical support for the calculation of production plans of a shipbuilding enterprise. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 925—929 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-925-929.

Постановка и основные результаты решения задачи. На содержательном уровне задачи синтеза технологий и комплексных планов функционирования судостроительного предприятия имеют следующую формулировку. Известно исходное структурное состояние предприятия, пространственно-временные, организационные, финансовые, технические и технологические ограничения, связанные с производственным процессом, заданы интервал времени, на котором осуществляется управление структурной динамикой, и соответствующая система показателей качества указанного управления. Требуется найти такую последовательность плановых и регулирующих воздействий на параметры, элементы, объекты, подсистемы структуры и в целом судостроительное предприятие, при которой для каждого заданного сценария изменения возмущающих воздействий обеспечивался бы оптимальный переход данной системы из текущего в требуемое многоструктурное макросостояние.

Данная задача относится к классу задач динамического многокритериального структурно-функционального синтеза сложной организационно-технической системы и построения расписания ее работы [1—4].

Практика показывает, что в начале планового периода может быть не ясно, хватит ли у судостроительного предприятия ресурсов на весь период для достижения поставленных заказчиком целей. Для этого должны предварительно решаться задачи оценивания и анализа производственного потенциала предприятия. В терминах оптимального управления данный класс задач относится к классу задач оценивания управляемости сложной организационно-технической системы. Если решение этой задачи существует, то целесообразно приступать к синтезу технологии и планов.

Для конкретизации и решения рассматриваемой задачи приведем ее следующее концептуальное описание [5, 6]. С этой целью введем множества: создаваемых объектов (например, судов либо стандартных судостроительных единиц); ресурсов предприятия; операций, входящих в производственные процессы.

Производственные операции связаны друг с другом с использованием логических операций „и“, „или“, „альтернативное или“. С помощью такого рода операций может быть задана альтернативная технология реализации производственных процессов. Пусть заданы основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, а также интервал времени, в течение которого собирается судно. Задана система показателей качества производственного плана. Необходимо, во-первых, оценить производственный потенциал предприятия на заданном интервале времени, и сформировать технологию и комплексный план его функционирования. Задана система показателей качества. Основными из них являются показатели, оценивающие: полноту выполнения технологических операций и процессов; суммарное нарушение директивных сроков реализации программы; равномерность использования ресурсов.

Говоря о методе и алгоритме синтеза технологии и комплексного плана функционирования судостроительного предприятия, необходимо указать, что в их основу был положен методический аппарат, базирующийся на комбинированном использовании методов последовательных приближений и ветвей и границ [7, 8].

В качестве исходных данных для разработанного модельно-алгоритмического обеспечения использовались следующая информация: описание вариантов производственных программ и реализующих их технологий; сроки реализации производственной программы в це-

лом; перечень типов изделий, подлежащих постройке; планируемые сроки постройки каждого изделия; приоритетность каждого изделия.

Для каждого типа изделия также задаются: перечень сборочных единиц изделия; перечень операций по созданию типовых сборочных единиц и их взаимосвязи; длительность выполнения каждой операции и возможные отклонения; технологические ограничения — перечень оборудования, на котором может выполняться конкретная операция; перечень оборудования и его характеристики (время выполнения каждой допустимой операции); прогнозируемые сценарии снижения производительности оборудования, вызываемые внешними, внутренними, объективными, субъективными причинами.

В результате решения рассматриваемой задачи формировался состав выходных данных для пессимистической и оптимистической оценки выполнимости производственной программы. Значения показателей качества: показатель выполнимости производственного плана; набор частных показателей качества реализации производственных планов для оптимистических и пессимистических сценариев изменения внешней и внутренней обстановки — показатель полноты выполнения технологических операций создания сборочных единиц; суммарное время нарушения директивных сроков выполнения операций, входящих в производственный план; показатель равномерности загрузки однотипного оборудования судостроительного предприятия; общее время выполнения производственного плана, а также конкретные интервалы времени и доля загрузки каждой единицы оборудования предприятия.

При синтезе технологий и комплексных производственных планов к основным выходным данным относятся выбранная оптимальная технология реализации производственного плана, а также сам план и расписание работы оборудования судостроительного предприятия. Проведенный анализ используемых в настоящее время на отечественных судостроительных предприятиях программных средств комплексного моделирования и планирования показал, во-первых, существенную гетерогенность программного и математического обеспечения, во-вторых, сложность или невозможность организации взаимодействия между программными средствами. Упомянутые выше программные средства комплексного моделирования и планирования представляют собой унаследованные программные системы в виде законченных решений (например, имитационная модель в среде AnyLogic, GPSS), реализующих имитационные модели судостроительного завода, прошедшие валидацию и верификацию. Такие подсистемы целесообразно использовать в составе предлагаемого программно-методического комплекса. Разработка подобных подсистем „с нуля“ представляет собой процесс, экономически не выгодный как с точки зрения трудозатрат, так и времени выполнения проекта. В связи с этим необходимо организовать программный комплекс таким образом, чтобы обеспечить беспрепятственный обмен согласованными исходными данными и выходным результатом между готовыми и создаваемыми программными средствами.

В разработанный полимодельный комплекс включены следующие унаследованные модули: расчета показателей надежности и критичности отказов; многокритериального оценивания и анализа интегральных показателей выполнимости производственных планов.

Связующее программное обеспечение, с помощью которого осуществляется централизованный и унифицированный событийно-ориентированный обмен сообщениями между различными информационными системами, реализовано в виде сервисной шины предприятия. Следует еще раз подчеркнуть, что стандартизация моделей взаимодействия веб-сервисов не определяет логику работы программного комплекса. Для этих целей используется язык описания последовательности действий и инфраструктура для его выполнения. В рассматриваемом примере используется реализация сервисной шины OpenESB, в которой имеется встроенный интерпретатор языка WS-BPEL. Вследствие этого выходной файл расчетного модуля, содержащий синтезированную технологию и план ее реализации, записанный в формате BPMN

2.0, конвертируется в исполняемый файл в формате WS-BPEL, который интерпретируется средствами OpenESB, реализуя бизнес-логику, т.е. взаимодействие между различными частями программного комплекса.

Заключение. В основу разработки экспериментального образца программного модуля положено полимодельное динамическое описание процесса функционирования судостроительного предприятия, включающее в себя комплекс моделей управления технологическими операциями, комплекс моделей управления оборудованием, комплекс моделей управления материальными потоками. Основное достоинство предложенных комплексов моделей состоит в том, что они, в отличие от существующих разработок, базируются на результатах современной теории проактивного управления сложными организационно-техническими объектами. Указанный фундаментальный научный базис предоставляет потенциальным пользователям возможность решения широкого спектра задач многовариантного прогнозирования, мониторинга и управления производственными процессами для различных сценариев изменения внешней и внутренней обстановки на предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. Л. и др. Технология судостроения: уч. для вузов / Под общ. ред. А. Д. Гармашева. СПб: Профессия, 2003. 342 с.
2. Павловский Ю. А. Имитационные модели и системы. М.: Фазис, 2000. 132 с.
3. Вавилов А. А., Имаев Д. Х., Плескунин В. И. и др. Имитационное моделирование производственных систем. М.: Машиностроение, 1983. 416 с.
4. Охтилев М. Ю., Зеленцов В. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Концепция проактивного управления сложными техническими объектами и технологии ее реализации // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 73—75.
5. Соколов Б. В., Охтилев М. Ю., Потрясаев С. А., Юсупов Р. М. Методы и алгоритмы адаптации моделей планирования промышленного производства // 5-я Междунар. науч.-практ. конф. „Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем“ (ИКМ МТМТС-2019). 2019. С. 166—172.
6. Потрясаев С. А. Синтез сценариев моделирования структурной динамики АСУ активными подвижными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 46—52.
7. Соколов Б. В., Крылов А. В., Охтилев М. Ю., Охтилев П. А., Потрясаев С. А. Логико-динамическая модель и алгоритмы комплексного планирования функционирования автоматизированной системы управления активными подвижными объектами // Тр. XIX Междунар. конф. „Проблемы управления и моделирования в сложных системах“. 2017. С. 508—513.
8. Потрясаев С. А. Математическое и программное обеспечение синтеза технологий и планов работы киберфизических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. С. 939—946.

Сведения об авторах

- Семен Алексеевич Потрясаев** — д-р техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник; E-mail: semp@mail.ru
- Екатерина Евгеньевна Щербакова** — аспирант; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: komaro2@mail.ru
- Юрий Вячеславович Коноплев** — Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра А5 динамика и управление полетом летательных аппаратов; научный сотрудник; E-mail: konoplev_iuv@voenmeh.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. Aleksandrov V.L. et al. *Tekhnologiya sudostroyeniya* (Shipbuilding Technology), St. Petersburg, 2003, 342 p. (in Russ.)
2. Pavlovsky Yu.A. *Imitatsionnyye modeli i sistemy* (Simulation Models and Systems), Moscow, 2000, 132 p. (in Russ.)
3. Vavilov A.A., Imaev D.Kh., Pleskunin V.I. et al. *Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh sistem* (Simulation Modeling of Production Systems), Moscow, 1983, 416 p. (in Russ.)
4. Potryasaev S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, no. 12(55), pp. 73–75. (in Russ.)
5. Sokolov B.V., Okhtilev M.Yu., Potryasaev S.A., Yusupov R.M. *Imitatsionnoye i kompleksnoye modelirovaniye morskoy tekhniki i morskikh transportnykh sistem (IKM MTMTS-2019)* (Simulation and Integrated Modeling of Marine Equipment and Marine Transport Systems (IKM MTMTS-2019)), Proceedings of the Fifth International Scientific and Practical Conference, 2019, pp. 166–172. (in Russ.)
6. Potryasaev S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 11(57), pp. 46–52. (in Russ.)
7. Sokolov B.V., Krylov A.V., Okhtilev M.Yu., Okhtilev P.A., Potryasaev S.A. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh* (Problems of Control and Modeling in Complex Systems), Proceedings of the XIX International Conference, 2017, pp. 508–513. (in Russ.)
8. Potryasaev S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 11(61), pp. 939–946. (in Russ.)

Data on authors

- Semen A. Potryasaev** — Dr. Sci.; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: semp@mail.ru
- Ekaterina E. Scherbakova** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: komaro2@mail.ru
- Yury V. Konoplev** — D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Aircraft Dynamics and Flight Control; Researcher; E-mail: konoplev_iuv@voenmeh.ru

Received 30.08.2022; approved after reviewing 14.09.2022; accepted for publication 31.10.2022.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2022 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ		
Аверьянов А. В., Эсаулов К. А., Зыкова С. С.	Перспективы использования распределенного бортового вычислительного комплекса в составе орбитальной тросовой системы	12
Ершов Д. С., Хайруллин Р. З.	Математическая модель рабочего места поверки средств измерений как нестационарной системы обслуживания	10
Есиков О. В., Титов Д. В.	Применение методов фрактального анализа изображений при решении задач оценки экологической обстановки и распознавания объектов	9
Ефанов Д. В.	Троичные модульные коды с суммированием для синтеза цифровых самопроверяемых устройств	5
Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б., Лесковец И. В.	Применение полиномиальных кодов при синтезе схем встроенного контроля для комбинационных устройств по методу логического дополнения	1
Ефанов Д. В., Пашуков А. В.	Взвешенные коды с суммированием в кольце вычетов по произвольному модулю для синтеза цифровых вычислительных устройств	4
Ефанов Д. В., Пивоваров Д. В.	Синтез самопроверяемых комбинационных устройств с контролем вычислений по двум диагностическим параметрам	7
Зиятдинов С. И.	Синтез дискретных полосовых и режекторных фильтров с использованием инвариантных импульсных и переходных характеристик	1
Копейка Е. А., Копейка А. Л., Барановский А. М.	Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом метрологических характеристик средств контроля	9
Коробков И. Л.	Метод оценивания максимального времени передачи пакетов в сетях со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием	2
Музыченко О. Н.	Сложность произвольных функций алгебры логики малого числа переменных	7
Ожиганов А. А., Прибыткин П. А.	Условие построения циклических кодов для композиционных кодовых шкал цифровых преобразователей угла	6
Павловский А. А., Солдаткин В. В., Солдаткин В. М.	Оценка разброса аэродинамических характеристик многофункционального приемника воздушного давления	6

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Поляков В. И., Зиннатулин Ф. Ф.	Верификация вычислительного процесса информационной системы	8
Салихов М. Р., Юрѳева Р. А.	Алгоритм прогнозирования состояния оборудования на основе машинного обучения	9
Стародубцев В. Г.	Множества ГМВ-подобных последовательностей для систем передачи и обработки цифровой информации	6
Стародубцев В. Г., Подолѳина Е. Ю., Келоглян А. Х.	Предпочтительные пары ГМВ-последовательностей с периодом $N=1023$ для систем передачи цифровой информации	1
Шелест М. Н., Татарникова Т. М.	Метод оценивания быстродействия больших информационных систем с кластеризацией транзакций	9

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Бобцов А. А., Каплин А. В., Николаев Н. А., Оськина О. В.	Идентификация нестационарных параметров линейной регрессионной модели при аддитивном влиянии неизмеряемого синусоидального возмущения	7
Данилова Т. В., Архипова М. А., Маслова М. А.	Автономный метод формирования оценок параметров ориентации звездных датчиков	4
Жарух А., Колюбин С. А.	Анализ производительности и настройка статических параметров однозапросных планировщиков траекторий	5
Иволга Д. В., Насонов К. В., Борисов И. В.	Содизайн неполноприводного прыгающего робота: сравнительный анализ виртуального и натурального экспериментов	12
Кабанов А. А., Зуев А. В., Филаретов В. Ф., Жирабок А. Н.	Идентификация дефектов в линейных системах на основе методов оптимального управления	5
Коновалов А. М., Коршунов А. И	Учет времени чистого запаздывания в прямой цепи при расчете дискретной коррекции цифровой следящей системы с минимальным временем полного затухания свободного процесса	8
Филаретов В. Ф., Кацурин А. А.	Согласованная работа двух мобильных роботов при автоматическом выполнении операций в сложной окружающей обстановке	9
Хоанг Дык Тхинь, Пыркин А. А.	Синтез алгоритма робастного управления движением мобильного робота вдоль гладкой траектории	7

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Ананенко В. М., Голяков А. Д., Сасункевич А. А.	Обоснование структуры нейронной сети для определения параметров движения орбитального объекта по результатам его наблюдений с борта космического аппарата	8
---	---	---

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
--------------------------	-----------------	---------------

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С.	Многоканальный преобразователь температуры	4
Вертегел Д. А.	Прецизионный электропривод на базе многофазного синхронного двигателя	1
Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А.	Минимизация пульсаций электромагнитного момента в пятифазном асинхронном электроприводе	12

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Атнашев А. Б., Цыбрин В. Г.	Повышение точности и быстродействия оптического дальномера за счет корреляционной обработки сигнала	1
Бородянский Ю. М., Колесниченко С. В., Майоров Е. Е., Константинова А. А., Петрова Е. А., Попова Е. В.	Абсорбционная спектроскопия стеклоомывающих жидкостей для автомобилей	7
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	5
Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. Г.	Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта	6
Кирилловский В. К., Точилина Т. В.	Изофотометрический метод определения линий спектра малой интенсивности	7
Кожина А. Д., Цыганок Е. А.	Разработка высокоапертурных объективов микроскопов с увеличенным полем зрения и регистрацией изображения на ПЗС-приемниках	8
Костюк Г. К., Шкуратова В. А., Петров А. А., Сергеев М. М.	Фазовые маски из двулучепреломляющих пластин для получения заданного очертания лазерных пучков с ультракороткими импульсами при обработке материалов в плоскости изображения	2
Майоров Е. Е.	Измерение оптических параметров покрасочного слоя колориметрическим прибором	6
Никитин М. М., Коняхин И. А., Добрых Ф. Г.	Алгоритм измерения углов поворота объекта автоколлимационным методом при использовании триэдрического отражателя с цилиндрической гранью	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Сечак Е. Н., Ерхова Н. Ф., Колесников А. О.	Метод адаптации составного главного зеркала телескопа	2
Шаламай Л. И., Майоров Е. Е., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оккас Н. С.	Определение рабочей толщины слоя современного стоматологического блокера методом спектроскопии	2

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Сотникова С. Ю., Кононова Н. А., Ландер Л. Б., Цветков В. Э., Яловнаров С. В.	Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов	10
Ходунков В. П., Заричняк Ю. П.	Перспективные методы измерения теплопроводности твердых тел	9

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Азарян Д. К., Медунецкий В. М.	Показатели эффективности технологического оборудования	5
Кузьменко В. П., Солёный С. В.	Разработка модели цифрового двойника для гибридной производственной линии по сборке светодиодных осветительных приборов	10
Пьяе П. А., Помпеев К. П., Николаев А. Д., Васильев О. С., Горный С. Г.	Модернизация конструкции корпуса лазерной головки с учетом возможностей аддитивного оборудования	1

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

Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О.	Экспериментальное определение значимости статистической оценки параметров, характеризующих вторичные диагностические показатели акустической эмиссии	10
Ефремов Л. В., Тикалов А. В.	Современные способы испытаний материалов на износ	12
Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В., Матковская Т. А.	Использование оптического волокна как основы для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов	12

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ		
Алешкин А. П., Гусаков В. М., Цыкунов В. Н.	Результаты моделирования процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами	2
Алешкин А. П., Савочкин П. В., Честных А. В., Балакирев С. Н.	Модель пространственно-временного синтеза объединенной функции раскрытия разнесенных антенных решеток	9
Антоненков Д. А.	Экспериментальные исследования гидрологических процессов в морских устьях рек с использованием STD-зонда	7
Арефьев А. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Удахина С. В.	Исследование постинъекционного эпидермиса модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо	4
Байденко С. В.	Проблематика улучшения характеристик фотоэлектрических преобразователей угла	2
Бакурский К. В., Макаров А. А., Мысливцев Т. О., Никифоров С. В.	Метод формирования групповой шкалы времени радиотехнических комплексов на основе адаптивной полиномиальной аппроксимации данных	4
Безбородов А. К., Деева И. Ю.	Поиск месторождений-аналогов на основе кластеризации байесовских сетей	1
Бушуев А. Б., Дударенко Н. А., Литвинов Ю. В., Мансурова О. К.	Численная оценка новизны устройства по формуле изобретения	12
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	5
Ефремов Л. В., Тикалов А. В.	Метод оценивания линейной и объемной износостойкости материалов	1
Ефремов Л. В., Тикалов А. В.	Экспериментальная оценка износостойкости пары трения типа „диск по диску“	4
Зайцев В. В.	Расчет длительности наблюдения при радиолокационной съемке	9
Зяярный В. П., Нефёдов Е. И., Сидякин Ю. И., Пономарев И. Н., Зяярный Д. В.	Оптимизация конструкции дисковой антенны кругового обзора микроволнового диапазона для датчиков, содержащих приемопередающие устройства	2

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Костюк Г. К., Степанюк Д. С., Шкуратова В. А., Петров А. А., Нестеров Н. А.	Влияние структурирования плавленного кварца лазерно-индуцированной микроплазмой и очистки на функционирование многосекторных бинарных фазовых пластин	10
Кутын А. Ю., Мусалимов В. М., Малов М. С.	Моделирование динамических процессов в системе управления плотностью композитной намотки	6
Малов М. С., Мусалимов В. М., Ловлин С. Ю.	Применение эластичных актуаторов с торсионной пружинной переменной жесткости в роботизированных устройствах реабилитации	7
Мещеряков В. Д., Николаев П. Н., Хусаинов А. А.	Определение ориентации платформы стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника	6
Петров К. С., Кондратенко Е. В., Петров В. В.	Разработка системы магнитоиндукционных датчиков для диагностирования износа гребней колесных пар подвижного состава	8
Серебрякова Ю. О., Полесский С. Н., Королев П. С.	Методика оценки продолжительности технологического прогона телекоммуникационного оборудования	8
Сизая А. В., Цивильский И. В.	Динамическая модель системы эластично связанных частиц для топологической оптимизации изделий из композитов	5
Скоробогатова О. А.	Оценка взаимного влияния двух рупорных излучателей, возбуждаемых мощными широкополосными импульсами в X-диапазоне	10
Строк Л. В., Коднянко В. А., Секацкий В. С.	Влияние отклонений размеров газостатических опор в прецизионном измерительном оборудовании на их эксплуатационные характеристики	6
Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И.	Расчет трещин в металлических конструкциях объектов транспортной инфраструктуры	6
Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И., Бибиков С. В.	Методы оценки технического состояния транспортного средства при помощи вибродиагностики	4
Фоменкова А. А.	Анализ работоспособности систем анаэробной биологической очистки сточных вод в процессе эксплуатации	2
Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Лампусова В. Б., Оксас Н. С.	Исследование новейших стоматологических материалов методом растяжения для получения параметра прочности на разрыв	8

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ		
Иволга Д. В., Хомутов Е. Э., Борисов И. И., Молчанов Н. А., Максимов И. А., Колюбин С. А.	Программно-аппаратная архитектура системы управления антропоморфной кистью робота	3
Насонов К. В., Борисов И. И.	Проектирование неполноприводного прыгающего робота с гибкими сочленениями	3
Хомутов Е. Э., Иволга Д. В., Борисов И. И., Молчанов Н. А., Максимов И. А.	Структурно-параметрический синтез плоских неполноприводных механизмов для антропоморфных роботизированных кистей	3
КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ И ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОБОТОВ В ЗАДАЧАХ МАНИПУЛИРОВАНИЯ		
Довгополик И. С., Артемов К., Борисов О. И., Забихифар С., Семочкин А. Н.	Алгоритм модифицированного интеллектуального двунаправленного случайного дерева для планирования движения антропоморфных манипуляторов	3
Ненахов И. Д., Артемов К., Забихифар С., Семочкин А. Н., Колюбин С. А.	Сегментация объектов с функцией дообучения	3
МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ		
Беркаев А. Р., Мохрат М., Бурков А. М., Колюбин С. А.	Метрико-семантическое картирование на основе глубоких нейронных сетей для систем автономной навигации в помещениях	3
Махмуд Ж., Ха Тхе Лонг В., Бурков А. М., Колюбин С. А.	Оптимизационные алгоритмы повышения точности и робастности визуальной одометрии наземных мобильных роботов	3
МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ		
Зеленцов В. А., Ковалев А. П.	Оценивание эксплуатационных затрат при расчете совокупной стоимости владения распределенными техническими комплексами	11
Кимяев И. Т., Спесивцев А. В.	Нечетко-возможностный подход к управлению сложностью интегрированных информационно-управляющих систем	11
Микони С. В.	Системный анализ моделей классификации и упорядочения объектов	11

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Охтилев М. Ю., Охтилев П. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.	Методологические и методические основы проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов	11
Павлов А. Н., Умаров А. Б., Павлов Д. А., Гордеев А. В.	Планирование реконфигурации многорежимных сложных объектов	11
Семенов А. И., Кулаков А. Ю.	Модельно-алгоритмическое обеспечение задач прогнозирования и планирования процесса заготовки кормов	11

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Кулешов С. В., Зайцева А. А., Аксенов А. Ю.	Формирование ядра документов в системах интернет-мониторинга в условиях ресурсных ограничений	11
Левшун Д. А.	Модель комбинированного применения интеллектуальных методов корреляции событий информационной безопасности	11
Летенков М. А., Яковлев Р. Н., Маркитантов М. В., Рюмин Д. А., Карпов А. А.	Применение методов синтеза обучающих данных для распознавания частично скрытых лиц на изображениях	11

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Соколов Б. В., Захаров В. В.	Методологические основы создания и использования цифровых двойников сложных объектов	12
Спесивцев А. В., Павлов А. Н.	Особенности выбора факторного пространства при оценивании и прогнозировании состояния сложного объекта	12
Потрясаев С. А., Щербакова Е. Е., Коноплев Ю. В.	Программно-математическое обеспечение расчета производственных планов судостроительного предприятия	12