

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

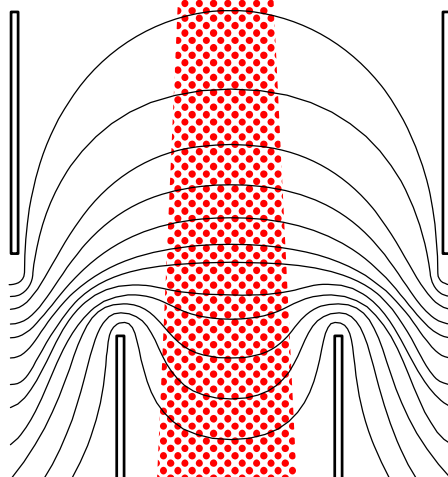
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ 8

Т. 65
2022

Journal of Instrument Engineering



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. КЛИМЧИК, PhD, доцент, Университет Иннополис, Иннополис, Россия
С. А. КОЛЮБИН, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. КОНЯХИН, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. КРИШТОП, д-р физ.-мат. наук, проф., ПНИПУ, Пермь, Россия
Л. С. ЛИСИЦЫНА, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЬЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО „ЦРТ-инновации“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО „Феррум“, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., 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 31.08.2022 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, список литературы;
- рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

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

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

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

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

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

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Поляков В. И., Зиннатулин Ф. Ф. Верификация вычислительного процесса информационной системы.....545

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- 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 процесса554

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 аппарата565

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Кожина А. Д., Цыганок Е. А. Разработка высокоапертурных объективов микроскопов с увеличенным полем зрения и регистрацией изображения на ПЗС-приемниках575

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Топорков П. С., Федосов Ю. В., Афанасьев М. Я. Автоматическое детектирование задира филамента в устройствах трехмерной печати.....581

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Петров К. С., Кондратенко Е. В., Петров В. В. Разработка системы магнитоиндукционных датчиков для диагностирования износа гребней колесных пар подвижного состава.....585
- Серебрякова Ю. О., Полесский С. Н., Королев П. С. Методика оценки продолжительности технологического прогона телекоммуникационного оборудования597
- 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.....612

EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor 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

AUGUST 2022

№ 8

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

Polyakov V. I., Zinnatulin F. F. Computing Process Verification in Information System545

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

Konovalov A. M., Korshunov A. I. Accounting for Net Delay Time in Direct Circuit when Calculating Discrete Correction of Digital Tracking System with Minimum Time of Free Process Total Attenuation.....554

GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

Ananenko V. M., Golyakov A. D., Sasunkevich A. A. Substantiation of the Neural Network Structure for Determining an Orbital Object Motion Parameters Based on Results of Its Observations from a Spacecraft.....565

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Kozhina A. D., Tsyganok E. A. Development of High-Aperture Microscope Objectives with an Enlarged Field of View and Image Recording on CCD Detectors575

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

Toporkov P. S., Fedosov Yu. V., Afanasyev M. Ya. Automatic Detection of Filament Burr in Three-Dimensional Printing Devices.....581

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Petrov K. S., Kondratenko E. V., Petrov V. V. Development of a System of Magnetic Induction Sensors for Diagnosing Wear of the Rolling Stock Wheelset Crest.....585

Serebryakova Yu. O., Polesskiy S. N., Korolev P. S. Methodology for Estimating the Duration of the Technological Run of Telecommunication Equipment597

Shalamay L. I., Mendosa E. Yu., Maiorov E. E., Lampusova V. B., Oksas N. S. Study of the Latest Dental Materials by Stretching to Obtain the Tensile Strength Parameter612

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, COMPUTER TECHNIQUE

УДК 004.896
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-545-553

ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В. И. Поляков*, Ф. Ф. Зиннатулин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* *v_i_polyakov@mail.ru*

Аннотация. Предложен способ верификации вычислительного процесса информационной системы. Актуальность исследования определяется востребованностью надежных, корректно работающих информационных систем при недостаточной их верификации. Верификация вычислительного процесса ранее не применялась к информационным системам. Рассматриваются вычислительные процессы информационной системы, а также основные блоки информационной системы „Конференция“. Используемые графоаналитическая и программная модели проверяют основные точки верификации вычислительного процесса. Рассмотрено использование разработанной системы верификации вычислительного процесса для веб-ориентированной информационной системы „Конференция“.

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

Ссылка для цитирования: Поляков В. И., Зиннатулин Ф. Ф. Верификация вычислительного процесса информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 545—553. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-545-553.

COMPUTING PROCESS VERIFICATION IN INFORMATION SYSTEM

V. I. Polyakov*, F. F. Zinnatulin

ITMO University, St. Petersburg, Russia

* *v_i_polyakov@mail.ru*

Abstract. A system of verification of the computing process in information system is proposed. The study relevance is determined by the demand for reliable, correctly functioning information systems and insufficient verification of such systems. Computing process verification has not been applied to information systems before. The computing processes in information system, as well as the main blocks of the information system "Conference" are considered. Applied graphical-analytic and software models check the main points of verification of the computing process. The use of the developed computing process verification system for the web-oriented information system "Conference" is considered.

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

For citation: Polyakov V. I., Zinnatulin F. F. Computing process verification in information system. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 545—553 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-545-553.

Информационная система (ИС) обрабатывает данные, получаемые от пользователей и базы данных, предоставляя информацию в удобной для пользователя форме отображения [1].

Информационная система может предоставлять информацию о дополнительных объектах, не хранимых в базе данных, и может обращаться к удаленным источникам информации в сети Интернет. В условиях общественно-экономической глобализации работа со значительными (до петабайт), быстро растущими объемами гетерогенных данных различной структурированности представляет собой существенную проблему [2]. ИС использует данные, получаемые от различных источников:

- 1) данные, вводимые пользователем с клавиатуры, как правило, понятны ему, однако требуют проверки корректности ввода;
- 2) данные, получаемые через подключенные к компьютеру устройства, как правило, требуют предварительной антивирусной проверки;
- 3) через удаленные ресурсы Интернета не всегда легко получить данные, поскольку могут возникать ошибки в передаче, а также есть вероятность наличия ошибки в загруженном файле;
- 4) данные, получаемые из электронных библиотек, как правило, могут содержать неподдерживаемый формат данных, либо могут возникать сложности с правами доступа;
- 5) данные, получаемые через источник документооборота компании, как правило, могут содержать непонятные пользователю или некорректно интерпретируемые пользователем символы.

С ИС могут взаимодействовать различные типы пользователей: разработчик ИС, администратор ИС, программист ИС, а также не подготовленный пользователь. Разработчик ИС настраивает соединение между средствами разработки и ИС, уровень владения знаниями об ИС у разработчика — профессионал. Администратор ИС использует только вспомогательное ПО для доступа к ИС, уровень владения знаниями об ИС у администратора — знаток. Программист ИС использует средства разработки и вспомогательное ПО для доступа к ИС, уровень владения — знаток. Пользователь, не знакомый с ИС, использует свои начальные знания об ИС, уровень владения — новичок.

ИС состоит из сопряженных друг с другом программных модулей, каждый из которых отвечает за функционирование ИС. Вообще проблема сопряжения различных технологий представления и обработки информации, основанных на принципиально различных по своей природе физических принципах, еще до конца не проработана [3]. Архитектура ИС включает: блок обработки данных, блок базы данных, блок отображения данных пользователю ИС, блок настроек ИС.

Блок обработки данных выполняет рассмотрение данных, которые собираются и вычисляются на основе входных данных. Блок базы данных ответствен за сохранение данных в типизированной форме. Блок отображения данных пользователю ИС отвечает за визуализацию формы и вида данных на экране пользователя. Блок настроек обеспечивает установку предварительных параметров для сохранения в базе данных или для отображения пользователю.

Проблема анализа качества аппаратного и программного обеспечения становится все более острой, особенно по мере расширения использования информационных технологий и нанотехнологий в приборостроении [4]. Увеличение объемов проектирования и разработки программного продукта, повышенные требования к его надежности и достоверности требуют все больше усилий для верификации программ на всех этапах жизненного цикла [5]. При верификации разного уровня представления модель более высокого уровня является метамоделью по отношению к модели низшего уровня представления [6].

Актуальность настоящей статьи обеспечивается неизученностью и недостаточной разработкой тематики верификации ИС и востребованностью надежных, корректно работающих ИС. Верификация вычислительного процесса не применялась ранее по отношению к масштабным ИС.

Цель настоящей статьи — верифицировать вычислительные процессы масштабных ИС.

Графоаналитическая модель использовалась как модель верификации вычислительного процесса САПР [4]. Применение графоаналитической модели для верификации вычислительного процесса САПР позволяет продемонстрировать весь процесс верификации, а структура определяет проектирование и разработку САПР. Однако система верификации вычислительных процессов пока не была разработана.

Рассмотрим работу ИС на уровне вычислительных процессов.

1. Вычислительные процессы обработки данных — выполнение математических, логических и функциональных операций над входными и уже обработанными данными.

2. Вычислительные процессы сохранения данных — операции соединения с базой данных, сохранения текущего соединения с базой данных, а также процесс успешно завершенной транзакции.

3. Вычислительные процессы вывода данных (сохраненных, а также обработанных данных в понятном для пользователя визуальном виде). Вывод включает в себя процессы передачи данных, а также визуализации на экране пользователя.

4. Вычислительные процессы отправки данных к физически удаленным источникам информации и получения от них — операции установления соединения с источником информации, сохранения соединения с источником информации, а также процесс получения статуса об успешном приеме информации.

Все перечисленные выше процессы должны быть верифицированы с помощью и графоаналитической, и программной моделей. Эти вычислительные процессы являются важными объектами программной составляющей ИС.

Для верификации данных вычислительных процессов необходимо спроектировать соответствующую систему, схема которой отражена на рис. 1.

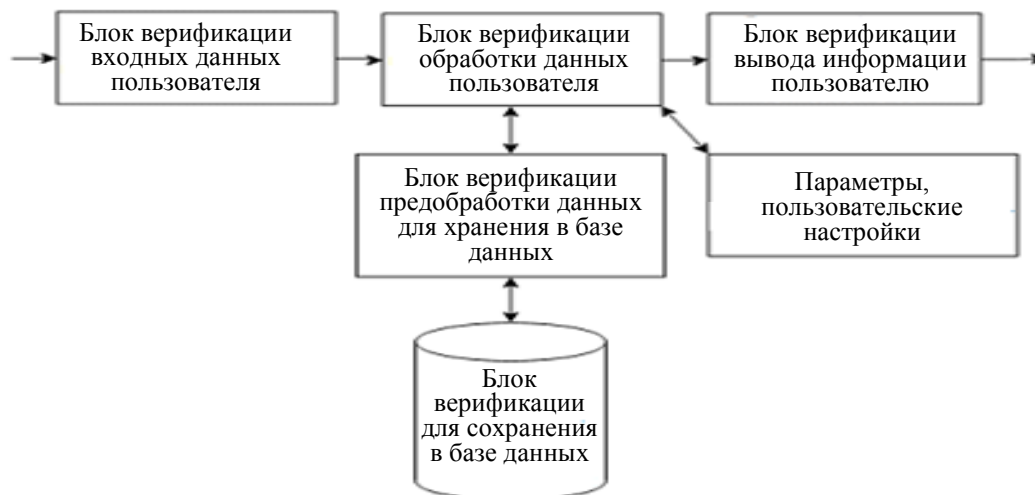


Рис. 1

Использование системы верификации обладает рядом преимуществ по сравнению с „ручным“ процессом:

1) нацеленность на определенный порядок верификации, что позволяет не пропускать важные этапы;

2) получение результата верификации в удобном для пользователя формате;

3) возможность обработки данных, хранимых в неотформатированном виде;

4) наличие базы данных для хранения результата промежуточных этапов верификации;

5) расширенный набор инструментов для получения корректного результата верификации вычислительного процесса.

Вычислительный процесс проходит через систему верификации в следующем порядке:

— блок верификации входных данных — выполняет первичное рассмотрение входных данных, проверяя тип получаемых переменных, значений;

- блок верификации обработки данных — выполняет проверку действия с переменными, значениями, вычисляет необходимые значения для вывода пользователю;
- блок верификации предобработки данных для хранения в базе данных — проверяет результат приведения переменных, значений к типам, используемым в базе;
- блок сохранения данных — проверяет, можно ли получить значение из базы данных после его сохранения;
- блок вывода данных пользователю — проверяет переменные, значения, полученные в результате вывода пользователю.

В системе верификации вычислительного процесса в ИС последовательно выполняется проверка:

- 1) входных данных для передачи в блок обработки данных;
- 2) обработки данных с использованием параметра пользовательской настройки;
- 3) предобработки данных для сохранения в базе данных;
- 4) сохранения данных в базе данных;
- 5) вывода данных пользователю.

Для определения функциональной структуры и системы процедур выработки решений в сложных предметных областях необходимо целостное модельное описание объектов и схем управления [7]. Операции математического и компьютерного моделирования очень часто связаны с решением задач, алгоритмы которых представляются в виде графов [8]. Графоаналитическая модель (ГАМ) верификации вычислительного процесса, проходящего через систему верификации, приведена на рис. 2. Каждый блок, кроме блоков „начало“ и „конец“, содержит одно арифметическое выражение [9]. Анализ программы на основе ГАМ осуществляется в несколько этапов [10].

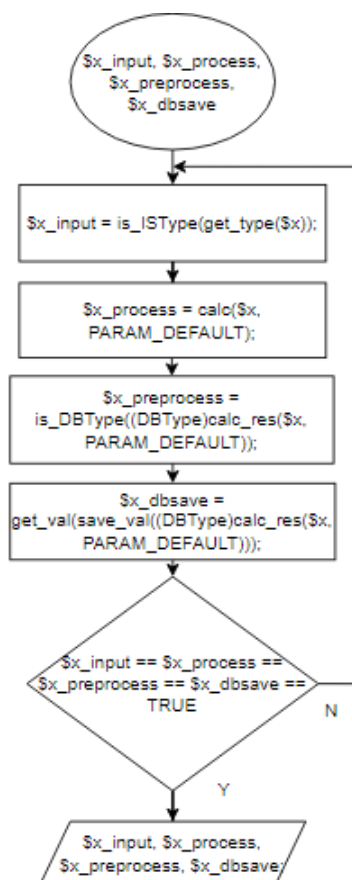


Рис. 2

Программная модель верификации вычислительного процесса представлена на рис. 3.

```

2      a:
3      function initValues(){
4          $x_input = 0;
5          $x_process = 0;
6          $x_preprocess = 0;
7          $x_dbsave = 0;
8      }
9
10     function setValues($x_input){
11         $x_input = is_IStype(get_type($x_input));
12         $x_process = calc($x_input, PARAM_DEFAULT);
13         $x_preprocess = is_DBType((DBType)calc_res($x_input, PARAM_DEFAULT));
14         $x_dbsave = get_val(save_val((DBType)calc_res($x_input, PARAM_DEFAULT)));
15     }
16
17     initValues($x_input);
18     setValues($x_input);
19
20     if($x_input == true){
21         if($x_process == true){
22             if($x_preprocess == true){
23                 if($x_dbsave == true){
24                     print $x_input, $x_process, $x_preprocess, $x_dbsave;
25                 }
26                 else goto a;
27             }
28             else goto a;
29         }
30         else goto a;
31     }
32     else goto a;

```

Рис. 3

Реализация функций, используемых в верификации вычислительного процесса в ИС, проиллюстрирована на рис. 4 и 5.

```

9      function is_IStype($x){
10         $is_type = (ISStandartType);
11         $val_type = type($x);
12         if($is_type == $x){
13             return true;
14         }
15         else return false;
16     }
17
18     function calc($x, $y){
19         if($y == "PARAM_DEFAULT"){
20             $hash_val = hash("md5", $x);
21             return true;
22         }
23         else if($y == "SHA"){
24             $hash_val = hash("sha256", $x);
25             return true;
26         }
27         else{
28             $hash_val = hash("sha1", $x);
29             return true;
30         }
31         return false;
32     }

```

Рис. 4

```

34 function calc_res($x, $y){
35     if($y == "PARAM_DEFAULT"){
36         $hash_val = hash("md5", $x);
37         return $hash_val;
38     }
39     else if($y == "SHA"){
40         $hash_val = hash("sha256", $x);
41         return $hash_val;
42     }
43     else{
44         $hash_val = hash("sha1", $x);
45         return $hash_val;
46     }
47 }
48
49 function is_DBType($x){
50     $is_type = (DBType);
51     $val_type = type($x);
52     if($is_type == $val_type){
53         return true;
54     }
55     else{
56         return false;
57     }
58 }

```

Рис. 5

В качестве примера объекта верификации используем ИС „Конференция“. В настоящее время качественное информационное сопровождение любого мероприятия подразумевает разработку интернет-сайта мероприятия [11]. ИС „Конференция“ предназначена для организации и проведения различных конференций. Тематические разделы могут быть следующими: информатика, программная инженерия и компьютерная техника, оптические технологии, робототехника и другие. Данная ИС отображает вывод в веб-представлении. Таким образом, к веб-представлению можно получить доступ через ресурсы сети Интернет.

Рассмотрим основные блоки ИС „Конференция“.

1. Блок регистрации участников конференции — позволяет занести желающих в список, таким образом, зарегистрировав в конференции. Дальнейший этап регистрации состоит в подтверждении ссылки, высланной на e-mail пользователя.

2. Блок личного кабинета — позволяет предоставить пользователю дополнительные возможности кроме просмотра информации о конференции. В нем могут быть реализованы такие функциональные возможности, как изменение (редактирование) заявки, внесение сведений о пользователе, просмотр дополнительных данных.

3. Блок информации о конференции — позволяет просмотреть сведения: дату, время и место проведения, тематические разделы, а также необходимые файлы для участия в конференции.

4. Блок рассылки e-mail — позволяет указать адрес пользователя (e-mail), по которому будут высылаются информационные письма о конференции. Данные письма могут содержать информацию о текущей, а также последующих конференциях, статусе проверки материалов к текущей конференции.

5. Блок обратной связи — позволяет связаться с авторами сайта, а также службой информационной поддержки, которая обладает знаниями о текущей конференции. Как правило, этот блок состоит из полей „автор“, „e-mail“, а также „сообщение“.

Рассмотрим некую информационную систему, в которой циркулирует закрытая информация, предназначенная для ввода, хранения, обработки и уничтожения [12].

Верификация вычислительного процесса работы ИС „Конференция“:

- 1) Есть ли предложения по работе системы?
- 2) Получается ли зарегистрироваться в текущей конференции?
- 3) Можно ли зайти в личный кабинет?

- 4) Можно ли указать свой e-mail для отправки?
- 5) Получается ли отправить вопрос по обратной связи?

Графоаналитическая модель верификации вычислительного процесса представлена на рис. 6. Программная модель верификации вычислительного процесса представлена на рис. 7.

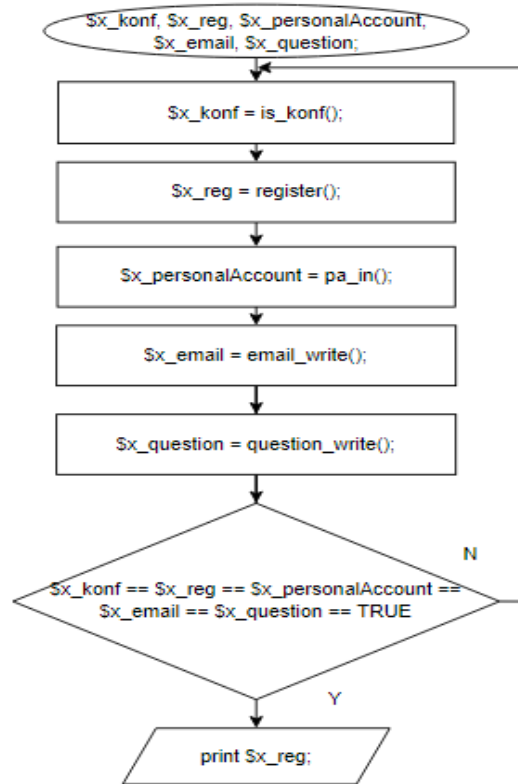


Рис. 6

```

3  a:
4  $x_konf = 0;
5  $x_reg = 0;
6  $x_personalAccount = 0;
7  $x_email = 0;
8  $x_question = 0;
9
10 function setValues($x){
11     $x_konf = is_konf();
12     $x_reg = register();
13     $x_personalAccount = pa_in();
14     $x_email = email_write();
15     $x_question = question_write();
16 }
17
18 setValues(1);
19
20 if($x_konf == true){
21     if($x_reg == true){
22         if($x_personalAccount == true){
23             if($x_email == true){
24                 if($x_question == true){
25                     print $x_reg;
26                 }
27                 else goto a;
28             }
29             else goto a;
30         }
31         else goto a;
32     }
33     else goto a;
34 }
35 else goto a;
  
```

Рис. 7

В статье исследованы вычислительные процессы информационной системы; рассмотрены процессы обработки, предобработки, сохранения и вывода данных. Описаны графоаналитические и программные модели. Разработана система верификации вычислительных процессов информационной системы „Конференция“. Выполнена верификация вычислительных процессов с помощью разработанной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнепс-Шнеппе М. А., Сухомлин В. А., Намиот Д. Е. О глобальных информационных системах // *International Journal of Open Information Technologies*. 2017. Т. 5, № 4. С. 55—62.
2. Зыков С. В. Теоретические и методологические основы построения корпоративных порталов // *Электронный журнал „Исследовано в России“*. 2005. № 8. С. 2278—2285 [Электронный ресурс]: <<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/220.pdf>>.
3. Петров А. Б. О характеристиках информационной системы // *Cloud of science*. 2020. Т. 7, № 3. С. 510—516.
4. Зыков А. Г., Безруков А. В., Немолочнов О. Ф., Поляков В. И., Андронов А. В. Графо-аналитические модели вычислительных процессов в САПР // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2011. № 4(74). С. 116—120.
5. Зыков А. Г., Голованев Я. С., Поляков В. И. Автоматизация верификации программ с использованием графоаналитических моделей вычислительного процесса // *Программные продукты и системы*. 2019. Т. 32, № 3. С. 398—402. DOI: 10.15827/0236-235X.127.398-402.
6. Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Поляков В. И. и др. Верификация в исследовательских, учебных и промышленных системах // *Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО*. 2003. Вып. 11. Актуальные проблемы анализа и синтеза сложных технических систем. С. 146—151.
7. Кононенко А. А. Блок синтеза концептуальных схем и блок построения комплекта организационных процедур // *Управление большими системами*. 1998. № 1. С. 58—62.
8. Шатлов К. Г. Редактор графов и блок-схем // *Доклады ТУСУР*. 2007. № 1(15) [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/redaktor-grafov-i-blok-shem>>.
9. Латышева И. О., Мазин М. А. Среда визуальной разработки блок-схем // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2007. № 7(41). С. 4—11.
10. Зыков А. Г., Кочетков И. В., Поляков В. И., Чистиков Е. Г. Синтезирование программ на основе описания графоаналитической модели // *Программные продукты и системы*. 2017. Т. 30, № 4. С. 561—566.
11. Хабитуев Б. В., Хандаров Ф. В., Балакишев Э. Г., Нимаев С. А. Информационная система „Конференция“ // *Вестн. БГУ. Математика, информатика*. 2013. № 1. С. 21—25.
12. Дрюков Н. Ю., Гатчин Ю. А. Методы формирования информационного поля в информационной системе // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2007. № 6(40). С. 215—220.

Сведения об авторах

- Владимир Иванович Поляков** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: v_i_polyakov@mail.ru
- Фаиль Фидаэлевич Зиннатулин** — аспирант; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: f_f_zinnatulin@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.22; одобрена после рецензирования 13.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Sneps-Snepp M., Sukhomlin V., Namiot D. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, no. 4(5), pp. 55–62. (in Russ.)
2. Zykov S.V. *Elektronnyy zhurnal "Issledovano v Rossii"*, 2005, no. 8, pp. 2278–2285, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/220.pdf>. (in Russ.)
3. Petrov A.B. *Cloud of science*, 2020, no. 3(7), pp. 510–516. (in Russ.)
4. Zykov A.G., Bezrukov A.V., Nemolochnov O.F., Polyakov V.I., Andronov A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 4(74), pp. 116–120. (in Russ.)

5. Zykov A.G., Golovanev Ya.S., Polyakov V.I. *Software & Systems*, 2019, no. 3(32), pp. 398–402, DOI: 10.15827/0236-235X.127.398-402. (in Russ.)
6. Nemolochnov O.F., Zykov A.G., Polyakov V.I. et al. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2003, no. 11, pp. 146–151. (in Russ.)
7. Kononenko A.A. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami*, 1998, no. 1, pp. 58–62. (in Russ.)
8. Shatlov K.G. *Proceedings of TUSUR University*, 2007, no. 1(15). (in Russ.)
9. Latysheva I.O., Mazin M.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2007, no. 41, pp. 4–11. (in Russ.)
10. Zykov A.G., Kochetkov I.V., Polyakov V.I., Chistikov E.G. *Software & Systems*, 2017, no. 4(30), pp. 561–566. (in Russ.)
11. Khabituev B.V., Khandarov F.V., Balakshiev E.G., Nimaev S.A. *BSU bulletin. Mathematics, Informatics*, 2013, no. 1, pp. 21–25. (in Russ.)
12. Dryukov N.Yu., Gatchin Yu.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2007, no. 40, pp. 215–220. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|-----------------------------|---|---|
| Vladimir I. Polyakov | — | PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: v_i_polyakov@mail.ru |
| Fail F. Zinnatulin | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: f_f_zinnatulin@mail.ru |

Received 20.04.22; approved after reviewing 13.05.22; accepted for publication 21.06.22.

**УЧЕТ ВРЕМЕНИ ЧИСТОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ПРЯМОЙ ЦЕПИ
ПРИ РАСЧЕТЕ ДИСКРЕТНОЙ КОРРЕКЦИИ ЦИФРОВОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ
С МИНИМАЛЬНЫМ ВРЕМЕНЕМ ПОЛНОГО ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНОГО ПРОЦЕССА****А. М. Коновалов, А. И. Коршунов****Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ**„Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“, Санкт-Петербург, Россия***a.i.korshunov@mail.ru*

Аннотация. Применение известной методики расчета цифровой следящей системы (ЦСС) с минимальным временем полного затухания свободного процесса при наличии времени чистого запаздывания в прямой цепи не позволяет физически реализовать корректирующее устройство (КУ). Адаптация методики расчета к рассматриваемому случаю основана на предварительном определении минимального времени затухания свободного процесса. Это позволило снизить порядок числителя желаемой передаточной функции замкнутой ЦСС до порядка числителя передаточной функции непрерывной части (НЧ) системы и обеспечить физическую реализацию КУ. Установлено, что минимальное время переходного процесса ЦСС увеличивается на время чистого запаздывания τ в прямой цепи, а скоростная ошибка возрастает на величину, равную произведению τ и скорости слежения Ω . Доказано, что выбор числителя желаемой передаточной функции замкнутой ЦСС, равной числителю дискретной передаточной функции НЧ, не только упрощает КУ и обеспечивает „грубость“ ЦСС, но также является необходимым и достаточным условием исключения „скрытых колебаний“ после полного затухания дискретного переходного процесса. Проведено сравнение предложенной методики расчета с методикой, основанной на использовании предиктора Смита. Рассмотрен пример расчета ЦСС с чистым запаздыванием в прямой цепи. Проведено ее цифровое моделирование в системе MatLab при отработке линейно возрастающего и скачкообразного задающего воздействия, подтвердившее минимальное время затухания свободного процесса и расчетное значение скоростной ошибки.

Ключевые слова: цифровая следящая система, время чистого запаздывания, затухание свободного процесса, конечное время

Ссылка для цитирования: 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 // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 554—564. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-554-564.

**ACCOUNTING FOR NET DELAY TIME IN DIRECT CIRCUIT WHEN CALCULATING DISCRETE CORRECTION
OF DIGITAL TRACKING SYSTEM WITH MINIMUM TIME
OF FREE PROCESS TOTAL ATTENUATION****A. M. Konovalov, A. I. Korshunov****Naval Polytechnic Institute of the Navy Military Educational and Scientific Center "Fleet Admiral N.G. Kuznetsov
Naval Academy", St. Petersburg, Russia***a.i.korshunov@mail.ru*

Abstract. The use of a well-known method for calculating a digital tracking system with a minimum time of complete attenuation of a free process in the presence of a net delay time in a direct circuit does not allow the correction device to be physically implemented. The adaptation of the calculation method to the case under consideration is based on the preliminary determination of the minimum attenuation time of the free process. This made it possible to reduce the

order of the numerator of the desired transfer function of the closed digital tracking system to the order of the numerator of the transfer function of the continuous part of the system and to ensure the physical implementation of the correction device. The minimum transition time of the digital tracking system is shown to increase by the time of the net delay t in the forward circuit, and the speed error increases by an amount equal to the product of t and the tracking speed. It is proved that the choice of the numerator of the desired transfer function of a closed digital tracking system equal to the numerator of the discrete transfer function of the continuous part, not only simplifies the correction device and ensures the digital tracking system "roughness", but is also a necessary and sufficient condition for the exclusion of "hidden oscillations" after the total attenuation of the discrete transient process. The proposed calculation method is compared with the method based on the use of the Smith predictor. An example of calculating a digital tracking system with a net delay in a direct circuit is considered. Its digital modeling was carried out in the MatLab system when working out linearly increasing and discontinuous setting effects, which confirmed the minimum attenuation time of the free process and the calculated value of the velocity error.

Keywords: digital tracking system, net delay time, free process attenuation, end time

For citation: Konovalov A. M., Korshunov A. I. Accounting for net delay time in direct circuit when calculating discrete correction of digital tracking system with minimum time of free process total attenuation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 554—564 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-554-564.

Введение. Цифровые следящие системы (ЦСС) являются одним из важнейших функциональных элементов автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) как в производственной, так и в оборонной области. Функциональная задача ЦСС — преобразование в реальном масштабе времени управляющего воздействия на технологический объект, определяемого вычислительным комплексом АСУ в цифровой форме, в соответствующее механическое воздействие. Из назначения следуют основные требования к ЦСС: высокое быстродействие и точность воспроизведения. Современный уровень развития вычислительной техники позволяет рассматривать ЦСС как импульсные системы, пренебрегая квантованием сигналов по уровню. Это позволяет использовать замечательное свойство линейных стационарных импульсных систем — возможность полного затухания свободного процесса за конечное время, обеспечивающее наибольшее быстродействие импульсной системы управления.

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

В доступных публикациях последнего времени не содержится исследований, посвященных развитию методики синтеза цифровых автоматических систем с конечным временем затухания свободного процесса. Более того, встречаются издания высокого уровня, например [5], — учебник для вузов (с грифом „Допущено УМО вузов России по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебника“), содержащий ошибочные рекомендации по синтезу электроприводов постоянного тока с конечным временем переходного процесса, заранее приводящие к длительно затухающим колебаниям выходной величины внутри периодов дискретизации. Это определило необходимость исправления указанных ошибок [6] и дальнейшего развития методики синтеза систем данного класса.

В работе [7] показана возможность с помощью линейного дискретного корректирующего устройства получить конечное время полного затухания свободного процесса в линеаризованной модели ЦСС, представленной на рис. 1 (ИИЭ — идеальный импульсный элемент с периодом дискретизации T , ФНП — фиксатор нулевого порядка). Это время не превышает целого числа периодов дискретизации, равного порядку непрерывной части (НЧ) ЦСС.

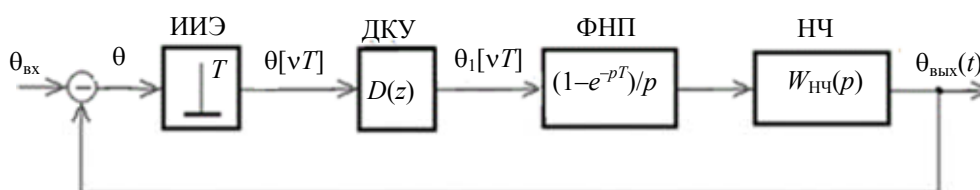


Рис. 1

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

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

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

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

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

где K — коэффициент преобразования, $T_1, \dots, T_{n-1}$ — постоянные времени исполнительного двигателя, усилителя мощности и других элементов НЧ. Установлена пропорциональность скоростной ошибки периоду дискретизации T , что при выборе T по требованию точности может вызвать завышение частоты дискретизации и сужение линейной зоны системы. В статье [9] предложен метод расчета ДКУ, обеспечивающий конечное время полного затухания свободного процесса, большее минимального, при сохранении скоростной ошибки как при минимальном времени полного затухания свободного процесса. В работе [10] предложена методика расчета ДКУ, обеспечивающего не только конечное время полного затухания свободного процесса, но и необходимый порядок астатизма (2 или 3) ЦСС.

В работах [6—10] не учтено время чистого запаздывания τ , всегда реально существующее в прямой цепи ЦСС. Его причиной могут быть существенное время выполнения вычислений в ДКУ, а также наличие времени чистого запаздывания в НЧ. В исследуемой линеаризованной математической модели ЦСС, представленной на рис. 2, время чистого запаздывания τ учтено звеном чистого запаздывания с передаточной функцией $e^{-p\tau}$.

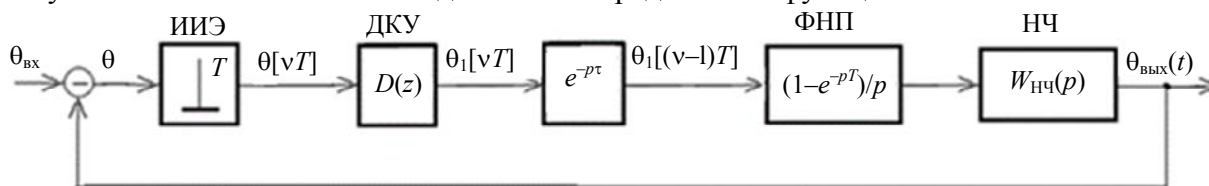


Рис. 2

В дальнейшем полагаем время запаздывания кратным периоду дискретизации, т.е. $\tau = lT$, l — целое число.

Непосредственное применение методики расчета ЦСС с конечным временем затухания свободного процесса, использованной в работах [6—10], при наличии времени чистого запаздывания в прямой цепи приводит к физически не реализуемому ДКУ. Это требует адаптации методики расчета ДКУ к случаю чистого запаздывания и определения необходимых и достаточных условий исключения скрытых колебаний на выходе внутри интервалов дискретизации после полного затухания дискретного переходного процесса.

Задача настоящей статьи — определение простейшей передаточной функции ДКУ, обеспечивающей минимальное время полного затухания переходной характеристики ЦСС с

запаздыванием, без применения известного, но весьма сложного подхода, основанного на использовании предиктора Смита [11, 12], „выводящего“ запаздывание из замкнутого контура управления. При этом предполагается и оценка снижения точности слежения ЦСС, вызванного временем чистого запаздывания.

Синтез передаточной функции ДКУ. Передаточная функция разомкнутой ЦСС (рис. 2) с учетом наличия чистого запаздывания в прямой цепи имеет вид:

$$W_{\text{ЦСС}}(z) = D(z)z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z), \quad (3)$$

где $D(z)$ — передаточная функция ДКУ, множитель z^{-l} учитывает время чистого запаздывания в прямой цепи $\tau=lT$, $W_{\text{НЧ}}(z)$ — дискретная передаточная функция НЧ совместно с ФНП,

$$W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_{\text{НЧ}}(p)}{p} \right\} = \frac{R_{n-1}(z)}{Q_n(z)}, \quad (4)$$

$$R_{n-1}(z) = \beta_{n-1}z^{n-1} + \dots + \beta_1z + \beta_0, \quad Q_n(z) = (z-1)(z-d_1)\dots(z-d_{n-1}),$$

$Z\{\dots\}$ — символ Z-преобразования [13], $d_i = \exp(-T/T_i)$, $i = 1, 2, \dots, n-1$, T_i — постоянные времени НЧ (2).

Передаточная функция замкнутой ЦСС с конечным временем затухания переходного процесса, как известно [1—4, 7], должна иметь вид:

$$\Phi_{\text{ЦСС}}(z) = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m}, \quad G_{m-1}(z) = g_{m-1}z^{m-1} + \dots + g_1z + g_0. \quad (5)$$

Согласно формулам (3), (5) находим передаточную функцию разомкнутой ЦСС:

$$W_{\text{ЦСС}}(z) = D(z)z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{\Phi_{\text{ЦСС}}(z)}{1 - \Phi_{\text{ЦСС}}(z)} = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} = \frac{g_{m-1}z^{m-1} + \dots + g_1z + g_0}{z^m - g_{m-1}z^{m-1} - \dots - g_1z - g_0}. \quad (6)$$

Из выражения (6) находим необходимую передаточную функцию ДКУ

$$D(z) = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} \bigg/ z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{(g_{m-1}z^{m-1} + \dots + g_1z + g_0)z^l}{z^m - g_{m-1}z^{m-1} - \dots - g_1z - g_0} \cdot \frac{Q_n(z)}{R_{n-1}(z)}. \quad (7)$$

Поскольку степень числителя $D(z)$ на l выше степени его знаменателя, ДКУ оказывается физически не реализуемым. Как будет ясно из дальнейшего, причиной этого является наличие чистого запаздывания в прямой цепи ЦСС.

С учетом времени чистого запаздывания в прямой цепи ЦСС, составляющего l периодов дискретизации, и минимального времени перевода НЧ из состояния $\theta_{\text{вых}} = 0 = \text{const}$ в состояние $\theta_{\text{вых}} \neq 0 = \text{const}$, согласно [7] составляющего n периодов дискретизации, минимальное значение m :

$$m = l + n. \quad (8)$$

Таким образом, время чистого запаздывания в прямой цепи увеличивает минимальное время полного затухания свободного процесса в ЦСС на его величину. Поскольку дискретный выходной сигнал ЦСС при отработке скачка появится в момент $t = (l+1)T$, степень числителя желаемой передаточной функции замкнутой ЦСС должна равняться

$$r = m - (l+1) = l + n - l - 1 = n - 1.$$

Следовательно, желаемая передаточная функция замкнутой ЦСС имеет вид:

$$\Phi_{\text{ЦСС}}(z) = \frac{G_{n-1}(z)}{z^m}, \quad G_{n-1}(z) = g_{n-1}z^{n-1} + \dots + g_1z + g_0. \quad (9)$$

Поскольку для удовлетворения известных требований „грубости“ ЦСС и сохранения первого порядка ее астатизма необходимо наличие единичного полюса передаточной функции $W_{\text{ЦСС}}(z)$ [13], должно выполняться условие:

$$z^m - g_{n-1}z^{n-1} - \dots - g_1z - g_0 \Big|_{z=1} = 0, \quad \text{или} \quad g_{n-1} + \dots + g_1z + g_0 = 1. \quad (10)$$

С учетом формул (4) и (9) находим необходимую передаточную функцию ДКУ:

$$D(z) = \frac{G_{n-1}(z)}{z^m - G_{n-1}(z)} / z^{-l} W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{G_{n-1}(z)z^l}{z^m - G_{n-1}(z)} \cdot \frac{Q_n(z)}{R_{n-1}(z)}. \quad (11)$$

При выборе полинома $G_{n-1}(z)$ кроме условий (10) необходимо выполнить:

- условие „грубости“ ЦСС;
- условие простоты ДКУ;
- условие отсутствия скрытых колебаний внутри интервалов дискретизации при $t > mT$.

Для обеспечения необходимой „грубости“ ЦСС [13] и желательной простоты ДКУ в работе [8] рекомендовано выбрать числитель передаточных функций $W_{\text{ЦСС}}(z)$ и $\Phi_{\text{ЦСС}}(z)$ равным числителю совместной дискретной передаточной функции НЧ и ФНП (4), т.е. $R_{n-1}(z)$. При этом с учетом требования (10) необходимо выполнить условие

$$\beta_{n-1} + \beta_{n-2} + \dots + \beta_1z + \beta_0 = 1. \quad (12)$$

Несложно показать (см. Теорему в Приложении), что рекомендованный выбор является необходимым и достаточным для исключения скрытых колебаний внутри интервалов дискретизации при $t > mT$.

Заметим, что возможное другое решение задачи, основанное на применении предиктора Смита [11, 12], сложнее, поскольку требует использования модели НЧ с запаздыванием, что также показано в Приложении.

Оценка скоростной ошибки ЦСС. Скоростная ошибка линеаризованной модели ЦСС определяется, как известно, выражением

$$\theta_k = \frac{\Omega T}{W_{\text{ЦСС1}}(1)}, \quad (13)$$

где $W_{\text{ЦСС1}}(z) = (z-1)W_{\text{ЦСС}}(z)$, $W_{\text{ЦСС1}}(1) = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)W_{\text{ЦСС}}(z)$.

В рассматриваемом случае с учетом (П.1) и (П.2) получаем

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)W_{\text{ЦСС}}(z) &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \frac{R_{n-1}(z)}{z^m - R_{n-1}(z)} = \frac{R_{n-1}(1)}{\lim_{z \rightarrow 1} [(z^m - R_{n-1}(z)) / (z-1)]} = \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} \beta_{n-1-i} / (m - \sum_{i=0}^{n-1} (n-1-i)\beta_{n-1-i}) = 1 / (l + \sum_{i=0}^{n-1} (i+1)\beta_{n-1-i}). \end{aligned} \quad (14)$$

При выполнении вычислений использованы правило Лопиталя и вытекающее из условия (12) равенство

$$R_{n-1}(1) = \beta_{n-1} + \beta_{n-2} + \dots + \beta_1 + \beta_0 = 1. \quad (15)$$

В результате θ_k можно представить в виде

$$\theta_k = \Omega T (l + \sum_{i=0}^{n-1} (i+1)\beta_{n-1-i}). \quad (16)$$

В статье [8] показано, что при достаточно малом периоде дискретизации T величину

$$\mu = \sum_{i=0}^{n-1} \beta_{n-1-i} / (l + \sum_{i=0}^{n-1} i\beta_{n-1-i}) = \frac{\beta_{n-1} + \beta_{n-2} + \dots + \beta_1z + \beta_0}{\beta_{n-1} + 2\beta_{n-2} + \dots + (n-1)\beta_1 + n\beta_0}$$

можно полагать постоянной, зависящей от порядка n передаточной функции $W_{\text{НЧ}}(p)$ (2). При рассматриваемых значениях $n = 2, 3, 4$ и 5 , согласно [8], $\mu = 2/3, 1/2, 2/5$ и $1/3$ соответственно. Таким образом, выражение (16) можно представить в виде:

$$\theta_k = \Omega(\tau + T/\mu), \quad (17)$$

Из полученного выражения (17) следует, что в ЦСС с конечным временем затухания свободного процесса время чистого запаздывания в прямой цепи повышает скоростную ошибку на величину $\Omega\tau$.

Пример. Рассмотрим ЦСС из примера, приведенного в работе [8], усложнив его наличием чистого запаздывания в прямой цепи. Исходные данные, заимствованные из статьи [8]:

$$W_{\text{НЧ}}(p) = \frac{K}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad T_1 = 0,1 \text{ с}, \quad T_2 = 0,02 \text{ с}, \quad T = 0,0025 \text{ с}, \quad W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{R_2(z)}{Q_3(z)} =$$

$$= \frac{\beta_2 z^2 + \beta_1 z + \beta_0}{(z-1)Q_2(z)}, \quad \beta_2/K = 1,2545 \cdot 10^{-6}, \quad \beta_1/K = 4,8346 \cdot 10^{-6}, \quad \beta_0/K = 1,1638 \cdot 10^{-6}, \quad Q_2(z) =$$

$$= (1-d_1)(1-d_2) = z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0, \quad d_1 = e^{-T/T_1}, \quad d_2 = e^{-T/T_2}, \quad \alpha_1 = -d_1 - d_2 = -1,8578, \quad \alpha_0 =$$

$$= d_1 d_2 = 0,86071.$$

Примем для определенности $\tau = lT$, $l = 3$, $\tau = 0,0075$ с.

Из условия (12) определяем необходимое значение коэффициента преобразования K :

$$K = 1/(\beta_2/K + \beta_1/K + \beta_0/K) = 1/(1,1638 \cdot 10^{-6} + 1,2545 \cdot 10^{-6} + 4,8346 \cdot 10^{-6}) =$$

$$= 1/7,2529 \cdot 10^{-6} = 1,3788 \cdot 10^5.$$

Минимальное время полного затухания свободного процесса: $t_{\Pi} = mT$, $m = l + n = 3 + 3 = 6$. По формулам (П.1) и (П.2) определяем передаточную функцию ДКУ:

$$D(z) = \frac{Q_2(z)z^3}{S_5(z)} = \frac{z^5 + \alpha_1 z^4 + \alpha_2 z^3}{z^5 + s_4 z^4 + s_3 z^3 + s_2 z^2 + s_1 z + s_0},$$

где $\alpha_1 = -1,8578$, $\alpha_0 = 0,86071$, $s_4 = s_3 = s_2 = 1$, $s_1 = 1 - \beta_2 = 1 - 1,2545 \cdot 10^{-6} \cdot 1,3788 \cdot 10^5 = 0,8270$, $s_0 = 1 - \beta_2 - \beta_1 = \beta_0 = 1,1638 \cdot 10^{-6} \cdot 1,3788 \cdot 10^5 = 0,1605$.

Для исследования процессов в ЦСС в системе Matlab 6.5 Simulink 5 построена ее цифровая модель, представленная на рис. 3. Временное запаздывание в цифровой модели учтено в дискретном блоке с передаточной функцией $D(z)z^{-l}$

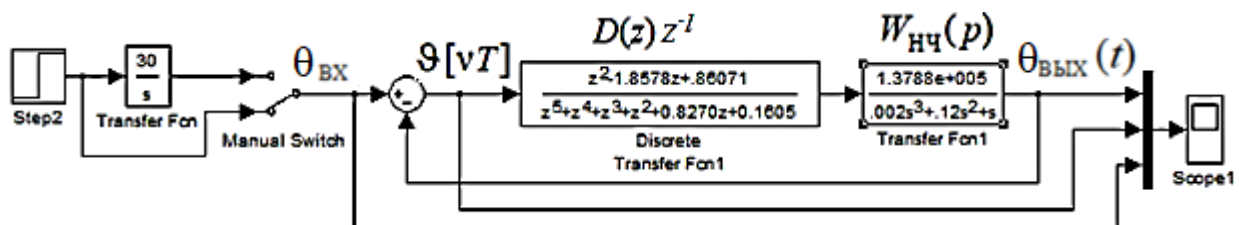


Рис. 3

На рис. 4 и 5 представлены соответственно процессы отработки единичного скачка и линейно возрастающего воздействия со скоростью $\Omega = 30^\circ/\text{с}$. Из рис. 4 видно, что свободный процесс на выходе системы начинается через три периода дискретизации и заканчивается еще через три периода, что согласуется с ожидаемым результатом.

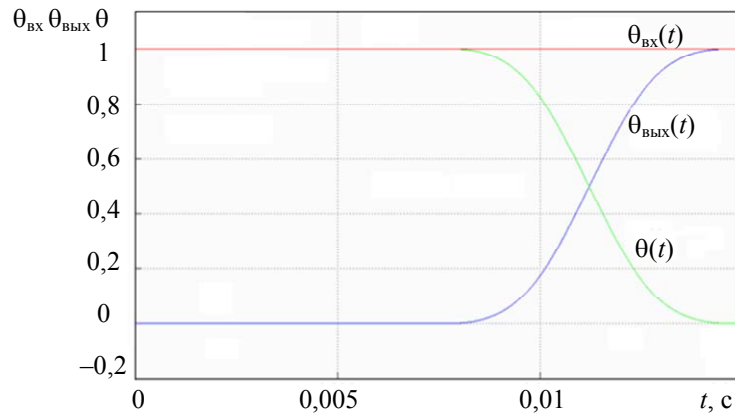


Рис. 4

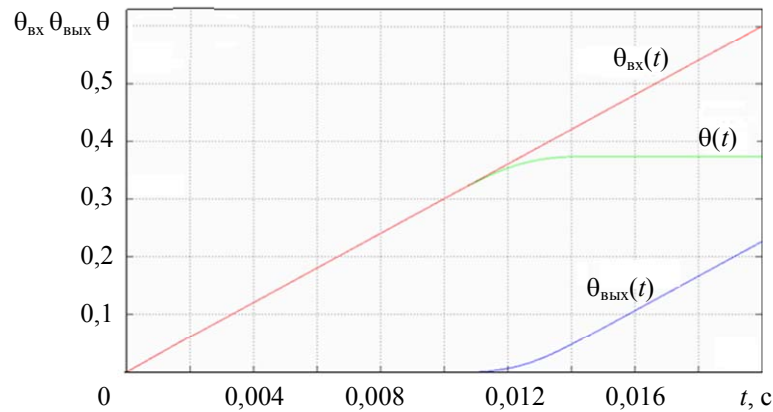


Рис. 5

При отработке линейно возрастающего воздействия, как видно из рис. 5, свободный процесс также заканчивается в конце 6-го периода дискретизации и устанавливается скоростная ошибка $\theta_k = 0,3741^\circ$. Расчетное ее значение составляет, согласно формуле (17), с учетом $\mu = 1/2$:

$$\theta_k = \Omega(\tau + T / \mu) = 30^\circ (0,0075 + 0,0025 / 0,5) = 0,375^\circ.$$

Небольшое расхождение с результатом моделирования вызвано приближенным значением $\mu = 1/2$. Вычислив его точное значение

$$\mu = \frac{\beta_2 + \beta_1 + \beta_0}{\beta_2 + 2\beta_1 + 3\beta_0} = \frac{1,2545 \cdot 10^{-6} + 4,8346 \cdot 10^{-6} + 1,1638 \cdot 10^{-6}}{1,2545 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 4,8346 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 1,1638 \cdot 10^{-6}} = 0,5031,$$

получаем значение

$$\theta_k = \Omega(\tau + T / \mu) = 30^\circ (0,0075 + 0,0025 / 0,5031) = 0,3741^\circ,$$

совпадающее со значением, полученным в результате моделирования.

Выводы

1. Предложен метод синтеза последовательного ДКУ, обеспечивающего минимальное время полного затухания свободного процесса при наличии чистого запаздывания в прямой цепи ЦСС. Минимальное время переходного процесса ЦСС увеличивается на время чистого запаздывания, как и при использовании предиктора Смита.

2. Рекомендованные условия выбора ДКУ являются необходимыми и достаточными для исключения скрытых колебаний внутри интервалов дискретизации после затухания дискретного переходного процесса.

3. Чистое запаздывание в прямой цепи ЦСС вызывает увеличение скоростной ошибки, пропорциональное его времени и скорости слежения.

4. Цифровое моделирование ЦСС при обработке линейно возрастающего и скачкообразного воздействий подтверждает правильность полученных результатов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Теорема. Выбор числителя желаемой передаточной функции $W_{\text{ЦСС}}(z)$ разомкнутой ЦСС равным числителю дискретной передаточной функции ФНП и НЧ $W_{\text{НЧ}}(z)$ (4), т.е. равным $R_{n-1}(z)$, необходим и достаточен для исключения скрытых колебаний внутри интервалов дискретизации после окончания дискретного переходного процесса.

Достаточность. Действительно, при рекомендуемом выборе

$$D(z) = \frac{G_{m-1}(z)}{z^m - G_{m-1}(z)} / [z^{-l} W_{\text{НЧ}}(z)] = \frac{R_{n-1}(z) z^l}{z^m - R_{n-1}(z)} \cdot \frac{Q_n(z)}{R_{n-1}(z)} = \frac{Q_{n-1}(z) z^l}{S_{m-1}(z)}, \quad (\text{П.1})$$

где $Q_{n-1}(z) = Q_n(z) / (z - 1) = (z - d_1)(z - d_2) \dots (z - d_{n-1}) = z^{n-1} + \alpha_{n-2} z^{n-2} + \dots + \alpha_1 z + \alpha_0$,

$$S_{m-1}(z) = [z^m - R_{n-1}(z)] / (z - 1) = z^{m-1} + z^{m-2} + \dots + z^{n-1} + (1 - \beta_{n-1}) z^{n-2} + (1 - \beta_{n-1} - \beta_{n-2}) z^{n-2} + \dots + (1 - \beta_{n-1} - \beta_{n-2} - \dots - \beta_2) z + (1 - \beta_{n-1} - \beta_{n-2} - \dots - \beta_2 - \beta_1), \quad (\text{П.2})$$

$$W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) = D(z) z^{-l} W_{\text{НЧ}}(z, \varepsilon) = \frac{Q_{n-1}(z) z^l}{S_{m-1}(z)} \cdot z^{-l} \cdot \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{Q_n(z)} = \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m - R_{n-1}(z)}, \quad (\text{П.3})$$

где ε — относительное смещение (локальное время) [13],

$$R_{n-1}(z, \varepsilon) = \beta_{n-1}(\varepsilon) z^{n-1} + \beta_{n-2}(\varepsilon) z^{n-2} + \dots + \beta_1(\varepsilon) z + \beta_0(\varepsilon).$$

Используя смещенное Z-преобразование [13], получаем передаточную функцию замкнутой ЦСС и ее переходную характеристику, описываемую смещенной решетчатой функцией $h[vT + \varepsilon T] = h(t)|_{t=vT+\varepsilon T}$, $v = 0, 1, 2, \dots$:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) &= \frac{W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)}{1 + W_{\text{ЦСС}}(z)} = \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m - R_{n-1}(z)} \bigg/ \left[1 + \frac{R_{n-1}(z)}{z^m - R_{n-1}(z)} \right] = \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m - R_{n-1}(z) + R_{n-1}(z)} = \\ &= \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m} = \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^n} z^{-l} = \frac{\beta_{n-1}(\varepsilon) z^{n-1} + \beta_{n-2}(\varepsilon) z^{n-2} + \dots + \beta_1(\varepsilon) z + \beta_0(\varepsilon)}{z^n} z^{-l}, \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

$$\begin{aligned} h[vT + \varepsilon T] &= Z^{-1} \{ [\beta_{n-1}(\varepsilon) z^{-l-1} + \beta_{n-2}(\varepsilon) z^{-l-2} + \dots + \beta_1(\varepsilon) z^{-m+1} + \beta_0(\varepsilon) z^{-m}] z / (z - 1) \} = \\ &= \beta_{n-1}(\varepsilon) I[(v - l - 1)T] + \beta_{n-2}(\varepsilon) I[(v - l - 2)T] + \dots + \beta_1(\varepsilon) I[(v - m + 1)T] + \beta_0(\varepsilon) I[(v - m)T], \end{aligned} \quad (\text{П.5})$$

Из выражения (П.5) с учетом свойств единичной решетчатой функции

$$I[vT] = \begin{cases} 0, & v < 0 \\ 1, & v \geq 0 \end{cases}$$

очевидно, что

$$h[vT + \varepsilon T] = \beta_{n-1}(\varepsilon) + \beta_{n-2}(\varepsilon) + \dots + \beta_1(\varepsilon) + \beta_0(\varepsilon) = \text{const} \text{ при } v \geq m, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1. \quad (\text{П.6})$$

Таким образом, из формулы (П.6) следует, что $h(t)|_{t \geq mT} = \text{const}$ и вследствие астатизма ЦСС равно единице или представляет собой периодическую (незатухающую) функцию, что невозможно вследствие вещественных полюсов $W_{\text{НЧ}}(p)$.

Этим доказано отсутствие скрытых колебаний $\theta_{\text{вых}}(t)$ в промежутках между моментами дискретизации при рекомендованном выборе числителя передаточной функции $W_{\text{ЦСС}}(z)$ и, следовательно $\Phi_{\text{ЦСС}}(z)$.

Необходимость. При любом другом выборе числителя $\Phi_{\text{ЦСС}}(z)$: $G_{n-1}(z) \neq R_{n-1}(z)$ получаем:

$$\begin{aligned} D(z) &= \frac{G_{n-1}(z)}{z^m - G_{n-1}(z)} \bigg/ \frac{W_{\text{НЧ}}(z)}{z^l} = \frac{G_{n-1}(z)z^l}{z^m - G_{n-1}(z)} \cdot \frac{Q_n(z)}{R_{n-1}(z)}, \quad W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) = \\ &= D(z) \frac{W_{\text{НЧ}}(z, \varepsilon)}{z^l} = \frac{G_{n-1}(z)z^l}{z^m - G_{n-1}(z)} \cdot \frac{Q_n(z)}{R_{n-1}(z)} \cdot z^{-l} \cdot \frac{R_{n-1}(z, \varepsilon)}{Q_n(z)} = \frac{G_{n-1}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{(z^m - G_{n-1}(z))R_{n-1}(z)}, \quad (\text{П.7}) \\ \Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon) &= \frac{W_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)}{1 + W_{\text{ЦСС}}(z)} = \frac{G_{n-1}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{(z^m - G_{n-1}(z))R_{n-1}(z) + G_{n-1}(z)R_{n-1}(z)} = \frac{G_{n-1}(z)R_{n-1}(z, \varepsilon)}{z^m R_{n-1}(z)}. \end{aligned}$$

Наличие у передаточной функции $\Phi_{\text{ЦСС}}(z, \varepsilon)$ (П.7) не равных нулю полюсов вызывает отличие $h(t)|_{t \geq mT}$ от единицы в промежутках между моментами дискретизации, хотя $h(vT)|_{v \geq m} = 1$, $v = m, m+1, m+2, \dots$. Это доказывает необходимость рекомендуемого выбора.

Использование предиктора Смита [11, 12]. Структурная схема рассматриваемой системы при использовании предиктора Смита представлена на рис. П.1.

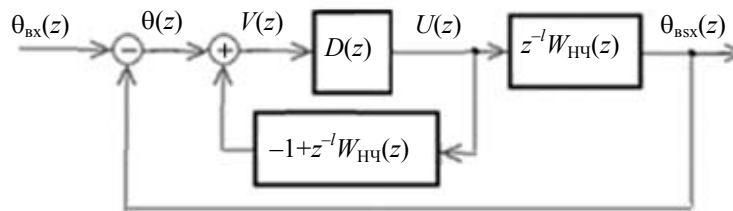


Рис. П.1

Согласно структурной схеме, с учетом $\theta_{\text{вых}}(z) = z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z)U(z)$, получаем

$$V(z) = \theta_{\text{bx}}(z) + (-1 + z^{-l})W_{\text{НЧ}}(z)U(z) - z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z)U(z) = \theta_{\text{bx}}(z) - W_{\text{НЧ}}(z)U(z).$$

И далее с учетом $U(z) = D(z)V(z)$ находим

$$\begin{aligned} \theta_{\text{вых}}(z) &= z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z)U(z) = z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z)D(z)V(z) = z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z)D(z)[\theta_{\text{bx}}(z) - W_{\text{НЧ}}(z)U(z)] = \\ &= z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z)D(z)[\theta_{\text{bx}}(z) - W_{\text{НЧ}}(z)\theta_{\text{вых}}(z) / z^{-l}W_{\text{НЧ}}(z)] = W_{\text{НЧ}}(z)D(z)[z^{-l}\theta_{\text{bx}}(z) - \theta_{\text{вых}}(z)]. \end{aligned}$$

Решив последнее уравнение относительно $\theta_{\text{вых}}(z)$, получим

$$\theta_{\text{вых}}(z) = \Phi_{\text{ЦСС}}(z)\theta_{\text{bx}}(z), \quad (\text{П.8})$$

где $\Phi_{\text{ЦСС}}(z) = \Phi'_{\text{ЦСС}}(z)z^{-l}$, $\Phi'_{\text{ЦСС}}(z) = \frac{W_{\text{НЧ}}(z)D(z)}{1 + W_{\text{НЧ}}(z)D(z)}$ — передаточная функция замкнутого

контура ЦСС с вынесенным из него запаздыванием. Для получения минимального конечного времени затухания свободного процесса в нем, согласно [7], передаточная функция должна иметь вид

$$\Phi'_{\text{ЦСС}}(z) = \frac{R_{n-1}(z)}{z^n}, \quad R_{n-1}(1) = \beta_{n-1} + \beta_{n-2} + \dots + \beta_1 z + \beta_0 = 1. \quad (\text{П.9})$$

Достигается это, если ДКУ имеет передаточную функцию

$$D(z) = \frac{\Phi'_{\text{ЦСС}}(z)}{(1 - \Phi'_{\text{ЦСС}}(z))W_{\text{НЧ}}(z)} = \frac{R_{n-1}(z)Q_n(z)}{(z^n - R_{n-1}(z))R_{n-1}(z)} = \frac{Q_{n-1}(z)}{S'_{n-1}(z)}, \quad (\text{П.10})$$

где

$$S'_{n-1}(z) = (z^n - R_{n-1}(z))/(z-1) = z^{n-1} + (1-\beta_{n-1})z^{n-2} + (1-\beta_{n-1}-\beta_{n-2})z^{n-3} - \dots - (1-\beta_{n-1}-\beta_{n-2}-\dots-\beta_2)z - (1-\beta_{n-1}-\beta_{n-2}-\dots-\beta_2-\beta_1).$$

С учетом выражения (П.9) передаточная функция ЦСС при использовании предиктора Смита $\Phi_{\text{ЦСС}}(z)$ (П.8) совпадает с $\Phi_{\text{ЦСС}}(z)$ (П.4), полученной предложенным методом.

Очевидная высокая сложность использования предиктора Смита при одинаковом результате частично компенсируется большей простотой передаточной функции дискретного фильтра $D(z)$ (ср. (П.10) и (П.1)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем. М.: Физматгиз, 1963. 968 с.
2. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963. 567 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
4. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1986. 447 с.
5. Анучин А. С. Системы управления электроприводов. М.: МЭИ, 2015. 372 с.
6. Коршунов А. И. Расчет цифровых систем управления электроприводами с конечным временем затухания свободных процессов // Электротехника. 2020. № 12. С. 50—54.
7. Коршунов А. И. Цифровая следящая система с конечным временем затухания свободного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 12. С. 1078—1086.
8. Коновалов А. М., Коршунов А. И. Расчет цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса. Ч. I. Минимальное время переходного процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 786—793.
9. Коновалов А. М., Коршунов А. И. Расчет цифровой следящей системы с конечным временем затухания свободного процесса. Ч. II. Время переходного процесса, большее минимального // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 794—796.
10. Коновалов А. М., Коршунов А. И. Цифровая следящая система с конечным временем затухания свободного процесса и заданным порядком астатизма // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 888—802.
11. Смит О. Дж. М. Автоматическое регулирование. М.: Физматгиз, 1962. 575 с.
12. Острем Л., Виттенмарк К. Системы управления с ЭВМ. М.: Мир, 1987. 480 с.
13. Бесекерский В. А. Цифровые автоматические системы. М.: Физматгиз, 1978. 575 с.

Сведения об авторах

Артем Михайлович Коновалов
Анатолий Иванович Коршунов

— офицер военно-морского флота Российской Федерации
 — д-р техн. наук, профессор; Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ „Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова“; кафедра радиоэлектроники; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.22; одобрена после рецензирования 02.06.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Tsyypkin Ya.Z. *Teoriya lineynykh impul'snykh sistem* (Theory of Linear Impulse Systems), Moscow, 1963, 968 p. (in Russ.)
2. Jury E.J. *Sampled-data control systems*, NY, Wiley, London, Chapman and Hall, 1958.
3. Isermann R. *Digital Control Systems*, Berlin etc., 1981.
4. Kuo B.C. *Digital Control Systems*, NY, Chicago, San Francisco, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980.
5. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* (Electric Drive Control Systems), Moscow, 2015, 373 p. (in Russ.)

6. Korshunov A.I. *Russian Electrical Engineering*, 2020, no. 12(91), pp. 767–771.
7. Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 12(62), pp. 1078–1086. (in Russ.)
8. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 9(63), pp. 786–793. (in Russ.)
9. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 9(63), pp. 794–796. (in Russ.)
10. Konovalov A.M., Korshunov A.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 10(63), pp. 888–802. (in Russ.)
11. Smith O.J.M. *Feedback control systems*, NY, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1958, 694 p.
12. Åström K., Wittenmark B. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*, 1984.
13. Besekerskiy V.A. *Tsifrovyye avtomaticheskiye sistemy* (Digital Automatic Systems), Moscow, 1976, 576 p. (in Russ.)

Data on authors

Artyom M. Konovalov

— Officer of the Russian Federation Navy

Anatoly I. Korshunov

— Dr. Sci., Professor; Naval Polytechnic Institute of the Navy Military Educational and Scientific Center “Fleet Admiral N.G. Kuznetsov Naval Academy”;
Department of Radio Electronics; E-mail: a.i.korshunov@mail.ru

Received 21.02.22; approved after reviewing 02.06.22; accepted for publication 21.06.22.

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

УДК 004.032.26
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-565-574

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЕГО НАБЛЮДЕНИЙ С БОРТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. М. АНАНЕНКО, А. Д. ГОЛЯКОВ, А. А. САСУНКЕВИЧ*

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

Аннотация. Обоснована структура многослойной нейронной сети прямого распространения, предназначенной для определения параметров движения центра масс некооперируемого орбитального объекта по результатам измерений, проводимых с помощью оптико-электронной системы космического аппарата. В качестве измеряемых параметров выбраны зенитные расстояния орбитального объекта в характерных точках орбиты космического аппарата и время пролета орбитального объекта между этими точками. Установлена наименьшая продолжительность обучения при заданной точности определения параметров движения центра масс орбитального объекта. Представленные результаты могут быть использованы при обосновании и разработке систем автономного определения параметров движения центра масс орбитального объекта на основе бортовых оптических средств космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая система, орбитальный объект, параметры движения центра масс орбитального объекта, бортовые измерения, нейронная сеть

Ссылка для цитирования: 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 // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 565—574. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-565-574.

SUBSTANTIATION OF THE NEURAL NETWORK STRUCTURE FOR DETERMINING AN ORBITAL OBJECT MOTION PARAMETERS BASED ON RESULTS OF ITS OBSERVATIONS FROM A SPACECRAFT

V. M. Ananenko, A. D. Golyakov, A. A. Sasunkevich*

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

Abstract. The structure of a multilayer neural network of direct propagation, designed to determine the motion parameters of the mass center of a non-cooperating orbital object by results of measurements carried out by a spacecraft optical-electronic system, is substantiated. The orbital object zenith distances at characteristic points of the spacecraft's orbit and the time of the orbital object's passage between these points were chosen as the measured parameters. The shortest duration of training for a given accuracy of determining the of the orbital object's center of mass motion parameters is determined. The presented results can be used in justification and development of systems for autonomous determination of the parameters of motion of the orbital object center of mass based on a spacecraft onboard optical means.

Keywords: spacecraft, onboard system, orbital object, motion parameters of orbital object mass center, onboard measurements, neural network

For citation: Ananenko V. M., Golyakov A. D., Sasunkevich A. A. Substantiation of the neural network structure for determining an orbital object motion parameters based on results of its observations from a spacecraft. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 565—574 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-565-574.

Введение. В настоящее время на околоземных орбитах находится значительное количество различных техногенных объектов в виде действующих космических аппаратов (КА) и способного нанести им ущерб „космического мусора“. Поэтому задача обеспечения безопасности выполняющих целевые функции КА, и в особенности пилотируемых орбитальных кораблей и станций, представляется исключительно актуальной.

С целью учета элементов космического мусора и прогнозирования их движения с необходимой точностью ведется каталог орбитальных объектов (ОО), совершающих движение в космическом пространстве [1]. Процесс составления каталога включает этап предварительного определения параметров движения (ПД) ОО, которые с течением времени уточняются. Оперативное решение этой задачи с применением наземных радиолокационных и оптических средств [2—4] не всегда представляется возможным. Поэтому для определения ПД центра масс ОО целесообразно использовать КА, в состав бортовой аппаратуры которого входит оптико-электронная система.

Одним из способов определения ПД ОО является рассмотренный, например, в работах [5—8] способ взаимной навигации, который основан на измерениях, проводимых с помощью оптико-электронных бортовых средств КА. Однако этот способ требует априорной информации о параметрах опорной орбиты ОО.

В отсутствие такой информации решается задача предварительного определения ПД ОО [9]. При решении этой задачи необходимо ввести достаточно значимые ограничения и допущения, например, совпадение плоскостей орбит КА и ОО [10] или нахождение только трех из шести ПД ОО [8].

Один из способов обойти перечисленные проблемы — использование искусственных нейронных сетей (НС), которые обладают адаптивными свойствами и способностью к самообучению. Вопросам применения НС в области анализа данных, получаемых от различных бортовых устройств летательных аппаратов, посвящены многочисленные исследования, например, работы [11—14]. Однако задача предварительного определения ПД ОО с помощью НС не получила своего решения.

Целью настоящей статьи является обоснование структуры НС, предназначенной для определения ПД ОО по результатам его наблюдений бортовыми оптико-электронными средствами КА.

Постановка задачи и принятые допущения. Для достижения поставленной цели введем следующие ограничения: движение КА и ОО происходит в центральном гравитационном поле Земли на круговых некомпланарных орбитах; параметры орбиты КА известны; радиус орбиты ОО больше радиуса орбиты КА; погрешности результатов измерений, выполняемых бортовыми средствами КА, отсутствуют; влияние атмосферы, притяжение Луны и давление солнечного ветра на КА и ОО не учитываются.

Ориентацию линии визирования (ЛВ) ОО бортовыми средствами КА определим в подвижной орбитальной системе координат (ПОСК) $n \tau b$, начало которой совмещено с центром масс КА (рис. 1). Оси ПОСК расположены в пространстве следующим образом: радиальная ось n является продолжением радиуса-вектора КА, нормальная ось b совпадает с нормалью к плоскости орбиты КА, трансверсальная ось τ лежит в плоскости орбиты КА и дополняет систему координат $n \tau b$ до правой.

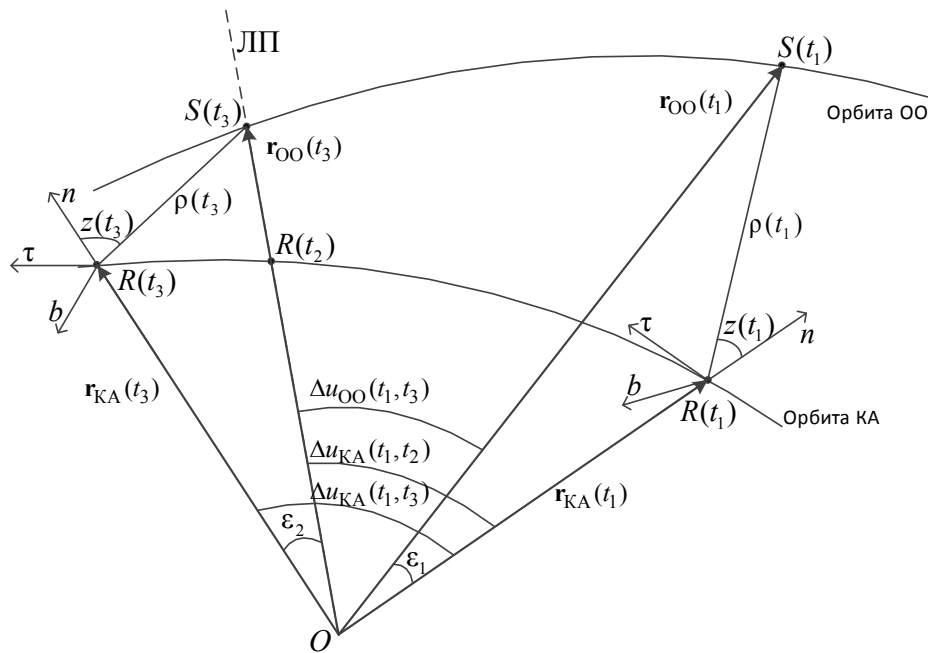


Рис. 1

Рассмотрим три момента времени t_1 , t_2 и t_3 . В момент времени t_1 проекция ЛВ ОО на трансверсальную ось τ равна нулю, момент времени t_2 соответствует моменту прохождения КА линии пересечения (ЛП) плоскостей орбит КА и ОО, в момент времени t_3 проекция ЛВ ОО на нормальную ось b равна нулю. Предположим, что бортовыми средствами КА фиксируются моменты времени t_1 и t_3 , в которые измеряются зенитные углы ЛВ $z(t_1)$ и $z(t_3)$.

Введем вектор измеряемых параметров $\Psi = [z(t_1) \ z(t_3) \ \Delta t]^T$, где Δt — интервал времени между моментами t_1 и t_3 : $\Delta t = t_3 - t_1$.

Поскольку движение ОО происходит по круговой орбите, искомый вектор ПД имеет вид $\mathbf{Q}_{OO} = [r_{OO} \ \Omega_{OO} \ i_{OO} \ \tau_{OO}]^T$, где r_{OO} — радиус орбиты ОО; Ω_{OO} — прямое восхождение восходящего узла орбиты ОО; i_{OO} — угол наклона орбиты ОО; τ_{OO} — время прохождения ОО восходящего узла.

Аналитическая зависимость между вектором измеряемых параметров Ψ и вектором искомых параметров $\mathbf{Q}_{OO}$ отсутствует. Найдём решение этой задачи с помощью НС, состоящей из искусственных нейронов, которые соединены между собой так называемыми синапсами, обеспечивающими отправку и получение информации (сигналов) между нейронами.

Решение задачи. Построим НС в два этапа. На первом этапе выберем структуру НС и обоснуем векторы ее входных и выходных параметров. На втором этапе определим процедуру обучения НС.

Этап № 1. Вид структуры НС обуславливает ее способность выполнить заданные функции. Для поиска закономерностей между выходными сигналами НС с ее входными сигналами широко применяется многослойная НС прямого распространения [15—17]. Особенность этой НС состоит в том, что первый слой соединен со всеми входами НС. Каждый нейрон произвольного слоя связан со всеми нейронами предыдущего слоя. Поскольку такая НС не содержит петель, в ней реализован процесс прямого распространения сигнала.

Для решения поставленной задачи воспользуемся многослойной НС прямого распространения [15].

Входными параметрами НС являются элементы трехмерного вектора Ψ . Введем вектор выходных параметров НС $\Theta = [\Delta u_{KA}(t_1, t_2) \ \Lambda \ r_{OO}]^T$, где $\Delta u_{KA}(t_1, t_2)$ — угол между радиусами-векторами КА в моменты времени t_2 и t_1 : $\Delta u_{KA}(t_1, t_2) = u_{KA}(t_2) - u_{KA}(t_1)$; $u_{KA}(t_j)$ — аргумент широты КА в момент времени t_j ; Λ — угол между плоскостями орбит КА и ОО. Покажем, что между вектором Θ выходных параметров НС и вектором Q_{OO} искомых ПД ОО существует аналитическая зависимость $Q_{OO} = F(\Theta)$.

Рассмотрим изображенные на рис. 2 проекции орбит КА и ОО на небесную сферу. На рис. 2 введены следующие обозначения: $\Delta\Omega$ — разность прямых восхождений восходящих узлов орбит ОО (Ω_{OO})* и КА (Ω_{KA}): $\Delta\Omega = \Omega_{OO} - \Omega_{KA}$; i_{KA} и i_{OO} — углы наклона орбиты КА и ОО; Δi — угол, смежный с углом наклона орбиты ОО: $\Delta i = \pi - i_{OO}$; $R(t_j)$ и $S(t_j)$ — положения на небесной сфере соответственно КА и ОО в момент времени t_j , $j = 1, 2, 3$; $u_{OO}(t_3)$ — аргумент широты ОО в момент времени t_3 .

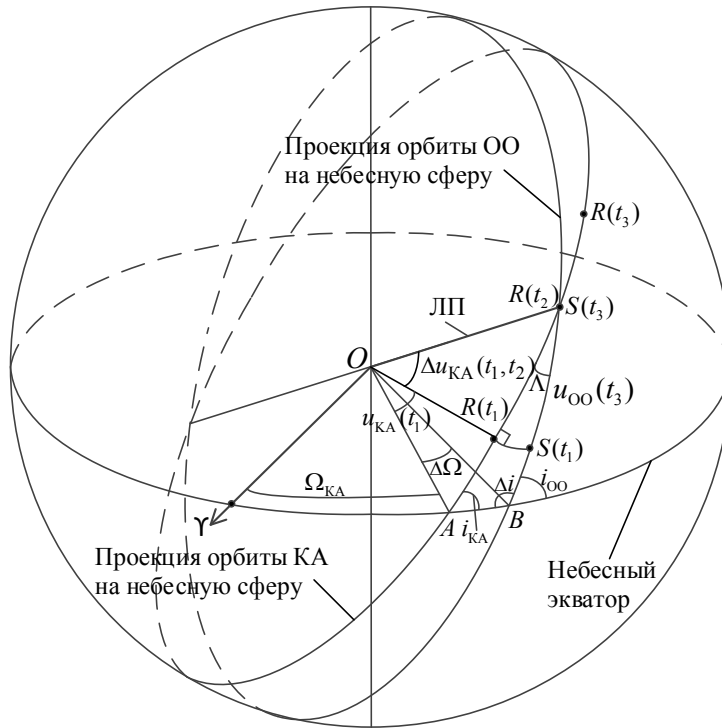


Рис. 2

Найдем угол наклона орбиты ОО (i_{OO}). Для решения этой задачи рассмотрим сферический треугольник $ABS(t_3)$, изображенный на рис. 2. Согласно теореме косинусов сферической тригонометрии получим:

$$\cos \Delta i = -\cos i_{KA} \cos \Lambda + \sin i_{KA} \sin \Lambda \cos(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)). \quad (1)$$

Поскольку $\Delta i = \pi - i_{OO}$, из выражения (1) находим:

$$\cos(\pi - i_{OO}) = -\cos i_{KA} \cos \Lambda + \sin i_{KA} \sin \Lambda \cos(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)), \quad (2)$$

откуда угол наклона орбиты ОО определяем из соотношения

* Угол Ω_{OO} на рис. 2 не показан.

$$i_{OO} = \arccos(\cos i_{KA} \cos \Lambda - \sin i_{KA} \cos(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)) \sin \Lambda). \quad (3)$$

Поскольку орбиты КА и ОО некомпланарные ($\Lambda \neq 0$), то для определения прямого восхождения восходящего узла орбиты ОО (Ω_{OO}) из сферического треугольника $ABS(t_3)$, который изображен на рис. 2, по теореме синусов сферической тригонометрии при условии, что $\Delta i \neq \pi$, находим

$$\frac{\sin \Delta \Omega}{\sin \Lambda} = \frac{\sin(\Omega_{OO} - \Omega_{KA})}{\sin \Lambda} = \frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2))}{\sin \Delta i}. \quad (4)$$

Из выражения (4) получаем формулу для расчета прямого восхождения восходящего узла орбиты ОО:

$$\Omega_{OO} = \Omega_{KA} + \arcsin\left(\frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)) \sin \Lambda}{\sin i_{OO}}\right). \quad (5)$$

Найдем время прохождения ОО восходящего узла (τ_{OO}). Из сферического треугольника $ABS(t_3)$ по теореме синусов сферической тригонометрии при условии, что $i_{KA} \neq 0$, находим

$$\frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2))}{\sin \Delta i} = \frac{\sin u_{OO}(t_3)}{\sin i_{KA}}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) после несложных преобразований получаем формулу для расчета аргумента широты ОО в момент времени t_3 :

$$u_{OO}(t_3) = \arcsin\left(\frac{\sin(u_{KA}(t_1) + \Delta u_{KA}(t_1, t_2)) \sin i_{KA}}{\sin i_{OO}}\right), \quad (7)$$

откуда находим время прохождения ОО восходящего узла

$$\tau_{OO} = t_3 - \frac{u_{OO}(t_3)}{\omega_{OO}}, \quad (8)$$

где $\omega_{OO} = \sqrt{\frac{\mu}{r_{OO}^3}}$ — орбитальная угловая скорость ОО; $\mu = 3,98602 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$ — гравитационный параметр Земли.

Таким образом, выражения (3), (5), (7) и (8) представляют аналитическую зависимость $\mathbf{Q}_{OO} = \mathbf{F}(\Theta)$ между вектором Θ выходных параметров НС и вектором $\mathbf{Q}_{OO}$ искомых ПД ОО.

Этап № 2. Обучение НС основано на синтезе функции $\mathbf{G}$, которая связывает выходной и входной векторы НС (Θ и Ψ) с заданной точностью, т.е. $\Theta = \mathbf{G}(\Psi)$.

Для формирования обучающей выборки НС используем функцию $\mathbf{G}^{-1}$, которая является обратной функцией $\mathbf{G}$. Найдем обратную зависимость $\Psi = \mathbf{G}^{-1}(\Theta)$.

Предположим, что известны компоненты вектора $\Theta = [\Delta u_{KA}(t_1, t_2) \quad \Lambda \quad r_{OO}]^T$. Введем углы $\varepsilon(t_1)$ и $\varepsilon(t_3)$ между радиусами-векторами КА и ОО в моменты времени t_1 и t_3 соответственно (см. рис. 1).

Для поиска угла $\varepsilon(t_1)$ рассмотрим фрагмент небесной сферы в области ЛП плоскостей орбит КА и ОО, который изображен на рис. 3

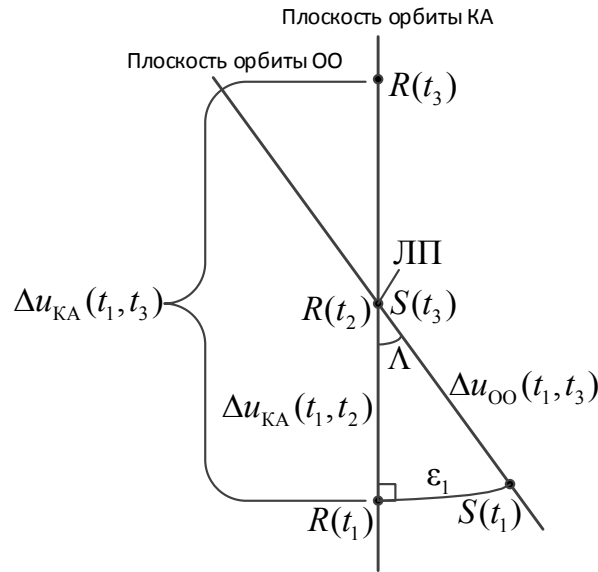


Рис. 3

Из сферического треугольника $R(t_1)S(t_1)S(t_3)$, у которого угол при вершине $R(t_1)$ — прямой, по теореме синусов получаем:

$$\frac{\sin \varepsilon(t_1)}{\sin \Lambda} = \sin \Delta u_{OO}(t_1, t_3), \quad (9)$$

где $\Delta u_{OO}(t_1, t_3)$ — разность аргументов широты ОО в моменты времени t_3 и t_1 :

$$\Delta u_{OO}(t_1, t_3) = u_{OO}(t_3) - u_{OO}(t_1).$$

Можно показать, что справедливо равенство

$$\Delta u_{OO}(t_1, t_3) = \arctg \frac{\tg \Delta u_{KA}(t_1, t_2)}{\cos \Lambda}, \quad (10)$$

где $\Delta u_{KA}(t_1, t_2)$ — разность аргументов широты КА в моменты времени t_2 и t_1 :

$$\Delta u_{KA}(t_1, t_2) = u_{KA}(t_2) - u_{KA}(t_1).$$

На основании соотношений (9) и (10) угол $\varepsilon(t_1)$ между радиусами-векторами КА и ОО в момент времени t_1 находим из выражения

$$\varepsilon(t_1) = \arcsin(\sin(\Delta u_{OO}(t_1, t_3)) \sin(\Lambda)). \quad (11)$$

Для определения угла $\varepsilon(t_2)$ запишем равенство (см. рис. 1):

$$\varepsilon(t_2) = \Delta u_{KA}(t_1, t_3) - \Delta u_{KA}(t_1, t_2), \quad (12)$$

где $\Delta u_{KA}(t_1, t_3)$ — разность аргументов широты КА в моменты времени t_3 и t_1 :

$$\Delta u_{KA}(t_1, t_3) = u_{KA}(t_3) - u_{KA}(t_1) = \omega_{KA} \Delta t;$$

$\omega_{KA} = \sqrt{\frac{\mu}{r_{KA}^3}}$ — орбитальная угловая скорость КА; Δt — интервал между моментами времени t_3 и t_1 :

$$\Delta t = t_3 - t_1 = \frac{\Delta u_{OO}(t_1, t_3)}{\omega_{OO}}.$$

Зенитные углы ОО $z(t_1)$ и $z(t_3)$ в моменты времени t_1 и t_3 (см. рис. 1) получим из выражений:

$$z(t_j) = \pi - \arccos \frac{r_{OO}^2 - r_{KA}^2 - 2\rho^2(t_j)}{-2r_{KA}\rho(t_j)}, \quad j=1,3, \quad (13)$$

где $\rho(t_j)$ — расстояние между КА и ОО в момент времени t_j :

$$\rho(t_j) = \sqrt{r_{KA}^2 + r_{OO}^2 - 2r_{KA}r_{OO} \cos \varepsilon(t_j)}.$$

Таким образом, искомая функция $\mathbf{G}^{-1}$ в виде соотношений (11)—(13) получена.

Исследуем влияние структуры многослойной НС прямого распространения на точность определения ПД ОО.

Для решения поставленной задачи сформированы девять вариантов структур многослойных НС прямого распространения с тремя входами, тремя выходами и равным количеством нейронов в каждом скрытом слое. Структура НС представлена на рис. 4, где k — число скрытых слоев, m — число нейронов в скрытом слое. Общее число нейронов в сформированных структурах для проведения исследования выбрано равным 36. Варианты структур НС имеют следующие соотношения числа скрытых слоев и числа нейронов в этих слоях ($k \times m$): $1 \times 36, 2 \times 18, 3 \times 12, 4 \times 9, 6 \times 6, 9 \times 4, 12 \times 3, 18 \times 2, 36 \times 1$.

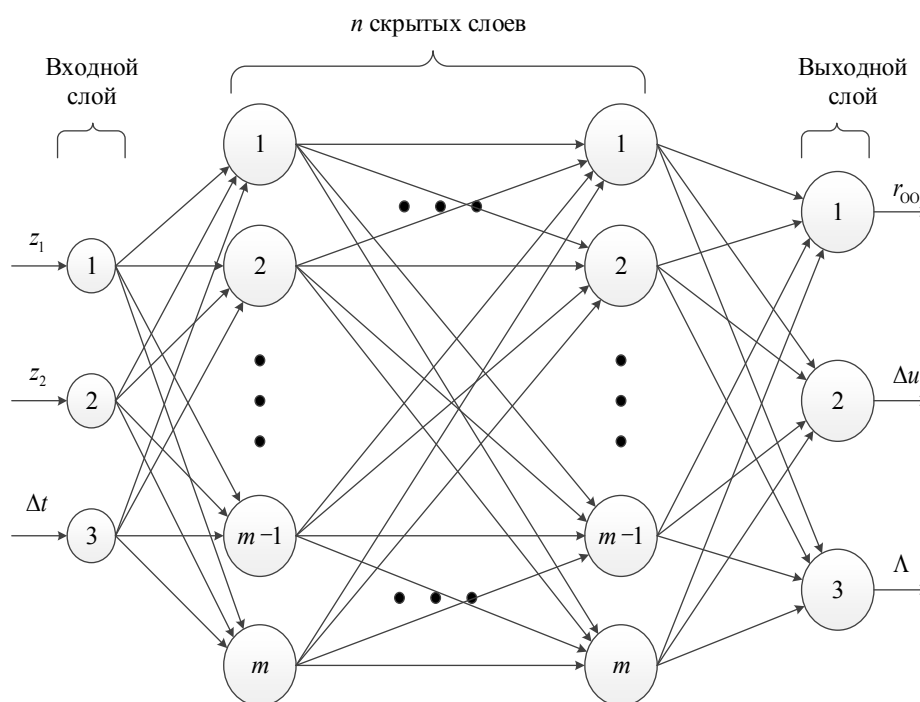


Рис. 4

На три нейрона входного слоя поступают измеренные параметры, с трех выходов снимается информация о выходных параметрах, которые получены по результатам работы НС.

Для всех вариантов структур НС использованы идентичные обучающая и тестовая выборки, включающие измеренные и выходные параметры НС. Погрешность определения ПД ОО (Δ) найдена по среднему для всей совокупности тестовой выборки значению расстояния между истинным положением центра масс ОО и определенным по бортовым измерениям.

Исследование проведено с использованием программного комплекса, разработанного в среде Matlab-Simulink, структура которого представлена на рис. 5.

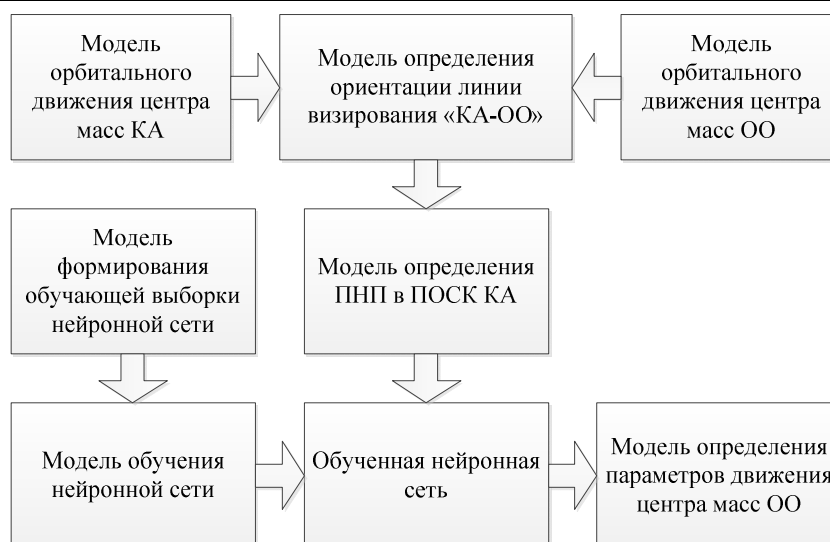


Рис. 5

Результаты исследования влияния различных структур НС на погрешность определения ПД ОО и время обучения НС представлены в таблице. Обучение различных структур НС проведено в течение 900 циклов. Время обучения исследуемых структур НС сравнивалось с наименьшим временем, которое принято за 100 %.

№ п/п	k	m	Общее число входов нейронов	Погрешность определения ПД ОО, км	Относительное время обучения нейросети, %
1	1	36	144	14,94	138
2	2	18	396	17,49	369
3	3	12	336	15,69	255
4	4	9	279	41,97	190
5	6	6	204	82,65	147
6	9	4	144	339,43	105
7	12	3	111	320,00	107
8	18	2	76	350,78	100
9	36	1	39	282,10	127

Анализ приведенных в таблице результатов показывает, что при равном количестве нейронов в сети погрешность определения ПД ОО ниже у сетей с меньшим числом слоев и соответственно — большим числом нейронов в слое (строки 1, 2, 3 таблицы). Характерной особенностью таких структур является большее общее число входов нейронов (синапсов), по сравнению с другими вариантами, при этом продолжительность обучения таких НС увеличивается.

Исследовано влияние числа циклов обучения НС (N) на погрешность определения ПД ОО с использованием сети с тремя скрытыми слоями и 12 нейронами в слое (рис. 6). Опыты проведены с $N = 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900$. Как видно из рисунка, после 300 циклов обучения значительного улучшения точности определения ПД ОО уже не происходит, что позволяет сократить время на обучения НС.

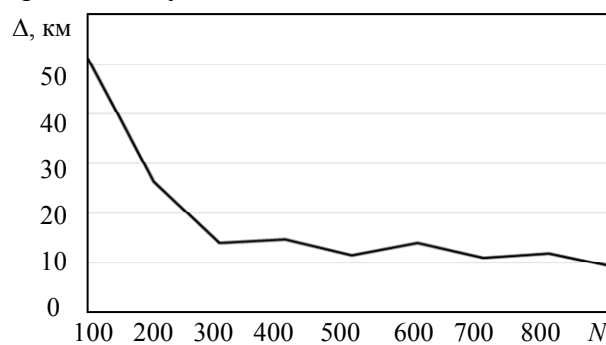


Рис. 6

Заключение. Для обеспечения безопасности функционирования КА на орбите необходимо оперативно определять параметры движения различных ОО, в том числе „космического мусора“. Такую задачу не всегда можно решить наземными средствами.

В настоящей работе для решения этой задачи использованы результаты бортовых измерений движения ОО относительно КА. Полученные данные предложено обрабатывать с помощью многослойной НС прямого распространения.

Проанализировано влияние различных типов структур НС на погрешность определения ПД ОО. Установлено, что наименьшую (из рассмотренных структур НС) погрешность определения ПД ОО имеет НС с одним скрытым слоем из 36 нейронов.

Представленные результаты могут найти применение при разработке бортовых систем определения параметров движения ОО в целях обеспечения безопасности полетов КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуторовский З. Н. Ведение каталога космических объектов // Космические исследования. 1993. Т. 31, вып. 4. С. 101—114.
2. Брандин В. Н., Разоренов Г. Н. Определение траекторий космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
3. Минаков Е. П., Власов Р. П. Алгоритм обработки траекторной информации уточнения параметров движения объектов по одновременным двукратным измерениям двумя космическими аппаратами роторного типа // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 184—191.
4. Глуценко А. А., Хохлов В. П. Алгоритм идентификации изменений и уточнения параметров движения техногенного объекта в околоземном космическом пространстве на основе радиолокационных измерений // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 12. С. 164—170.
5. Голяков А. Д. Введение в теорию взаимной навигации искусственных спутников Земли. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 1992. 142 с.
6. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. Монография. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. 453 с.
7. Аншаков Г. П., Голяков А. Д., Петрищев В. Ф., Фурсов В. А. Автономная навигация космических аппаратов. Самара: Гос. науч.-произв. ракетно-космический центр „ЦСКБ-Прогресс“, 2011. 486 с.
8. Голяков А. Д., Ананенко В. М., Фоминов И. В. Системы навигации летательных аппаратов. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. 273 с.
9. Трещалин А. П. Применение оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов для предварительного определения параметров орбит околоземных объектов // Труды МФТИ. 2012. Т. 4, № 3. С. 122—131.
10. Ананенко В. М., Голяков А. Д., Калабин П. В. Метод предварительного решения задачи навигации космического робота по бортовым астрономическим измерениям с использованием фильтра Баттерворта // Вестн. Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 2. С. 7—18.
11. Суханов Н. В. Схема управления летательным аппаратом на основе нейронных сетей // Электронный журнал „Труды МАИ“. 2013. Вып. 65 [Электронный ресурс]: <<http://trudymai.ru/published.php?ID=36013>>.
12. Кореванов С. И., Казин В. В. Искусственные нейронные сети в задачах навигации беспилотных летательных аппаратов // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2014. № 201. С. 46—49.
13. Воронцов В. А., Федоров Е. А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. 2015. Вып. 82 [Электронный ресурс]: <<https://trudymai.ru/published.php?ID=58817>>.
14. Михайлин Д. А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 04. С. 18—24.
15. Саттон Р. С., Барто Э. Дж. Обучение с подкреплением / Пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.

16. Горбачевская Е. Н. Классификация нейронных сетей // Вестн. Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2012. Вып. 2 (19). С. 23—24.
17. Богославский С. Н. Область применения искусственных нейронных сетей и перспективы их развития // Науч. журн. КубГАУ. 2007. № 27(3). С. 228—238.

Сведения об авторах

- Владимир Михайлович Ананенко** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; старший преподаватель;
E-mail: avm-brok@mail.ru
- Алексей Дмитриевич Голяков** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; профессор;
E-mail: algol1949@mail.ru
- Александр Анатольевич Сасункевич** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; E-mail: saa-soso@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.05.22; одобрена после рецензирования 25.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Hutorovsky Z.N. *Space Research*, 1993, no. 4(31), pp. 101–114. (in Russ.)
2. Brandin V.N., Razorenov G.N. *Opredeleniye trayektoriy kosmicheskikh apparatov* (Determination of Spacecraft Trajectories), Moscow, 1978, 216 p. (in Russ.)
3. Minakov E.P., Vlasov R.P. *Proceedings of the Tula State University, Technical Sciences*, 2019, no. 3, pp. 184–191. (in Russ.)
4. Glushchenko A.A., Khokhlov V.P. *Proceedings of Tula State University, Technical Sciences*, 2021, no. 12, pp. 164–170. (in Russ.)
5. Golyakov A.D. *Vvedeniye v teoriyu vzaimnoy navigatsii iskusstvennykh sputnikov Zemli* (Introduction to the Theory of Mutual Navigation of Artificial Earth Satellites), St. Petersburg, 1992, 142 p. (in Russ.)
6. Kuznetsov V.I. *Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy metodov i algoritmov avtonomnoy navigatsii i oriyentatsii kosmicheskikh apparatov* (Automated System of Scientific Research of Methods and Algorithms of Autonomous Navigation and Orientation of Spacecraft), St. Petersburg, 2010, 453 p. (in Russ.)
7. Anshakov G.P., Golyakov A.D., Petrishchev V.F., Fursov V.A. *Avtonomnaya navigatsiya kosmicheskikh apparatov* (Autonomous Navigation of Spacecraft), Samara, 2011, 486 p. (in Russ.)
8. Golyakov A.D., Ananenko V.M., Fominov I.V. *Sistemy navigatsii letatel'nykh apparatov* (Aircraft Navigation Systems), St. Petersburg, 2018, 273 p. (in Russ.)
9. Treshchalin A.P. *Proceedings of the MIPT*, 2012, no. 3(4), pp. 122–131. (in Russ.)
10. Ananenko V.M., Golyakov A.D., Kalabin P.V. *Vestnik of Samara University. Aerospace engineering, technology and engineering*, 2020, no. 2(19), pp. 7–18. (in Russ.)
11. Sukhanov N.V. *Proceedings of the MAI*, 2013, no. 65, <http://trudymai.ru/published.php?ID=36013>. (in Russ.)
12. Korevanov S.I., Kazin V.V. *Scientific Vestnik of MSTU GA*, 2014, no. 201, pp. 46–49. (in Russ.)
13. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. *Proceedings of MAI*, 2015, no. 82. <https://trudymai.ru/published.php?ID=58817>. (in Russ.)
14. Mikhailin D.A. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2017, no. 04(20), pp. 18–24. (in Russ.)
15. Sutton R.S., Barto Andrew G. *Reinforcement learning*, Cambridge, Mass MIT Press, 2018.
16. Gorbachevskaya E.N. *Bulletin of Volga University named after V.N. Tatishchev*, 2012, no. 2(19), pp. 23–24. (in Russ.)
17. Bogoslavskiy S.N. *Scientific Journal of KubGAU*, 2007, no. 3(27), pp. 228–238. (in Russ.)
18. Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivye sistemy* (The Self-Checked Devices and Failure-Safe Systems), Moscow, 1989, 208 p. (in Russ.)

Data on authors

- Vladimir M. Ananenko** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; Senior Lecturer;
E-mail: avm-brok@mail.ru
- Alexey D. Golyakov** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; Professor; E-mail: algol1949@mail.ru
- Alexander A. Sasunkevich** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; E-mail: saa-soso@rambler.ru

Received 05.05.22; approved after reviewing 25.05.22; accepted for publication 21.06.22.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПОВ
С УВЕЛИЧЕННЫМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПЗС-ПРИЕМНИКАХ

А. Д. КОЖИНА*, Е. А. ЦЫГАНОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* adkozhiba@itmo.ru

Аннотация. Целью работы является усовершенствование световых микроскопов для биологических исследований, регистрирующих изображения на ПЗС-приемниках, обеспечивая работу без временных затрат на перефокусировку оптики. Показана перспективность и актуальность разработки высокоапертурных объективов микроскопов с увеличенным полем зрения, работающих совместно с матричным ПЗС-приемником изображения. Разработан высокоапертурный широкопольный объектив микроскопа, приведены его оптические характеристики и показана оптическая схема. Проведены оценка и расчет допусков для последующего изготовления по методу Монте-Карло.

Ключевые слова: высокоапертурный объектив, микроскопия, анализ крови, коррекция аберраций, микрообъектив, поле зрения

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Ссылка для цитирования: Кожина А. Д., Цыганов Е. А. Разработка высокоапертурных объективов микроскопов с увеличенным полем зрения и регистрацией изображения на ПЗС-приемниках // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 575—580. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-575-580.

DEVELOPMENT OF HIGH-APERTURE MICROSCOPE OBJECTIVES
WITH AN ENLARGED FIELD OF VIEW AND IMAGE RECORDING ON CCD DETECTORS

A. D. Kozhina*, E. A. Tsyganok

ITMO University, St. Petersburg, Russia

* adkozhiba@itmo.ru

Abstract. The aim of the work is to improve light microscopes for biological research, which record images on CCD detectors, providing operation without time spent on optics refocusing. The prospects and relevance of the development of high-aperture microscope objectives with an enlarged field of view, operating in conjunction with a matrix CCD image detector, are shown. A high-aperture wide-field microscope objective has been developed, its optical characteristics are given, and the optical scheme is demonstrated. Evaluation and calculation of tolerances for subsequent manufacturing by the Monte Carlo method are carried out.

Keywords: high-aperture objective, microscopy, blood test, aberration correction, micro-objective, field of view

Acknowledgments: The study was supported by RPMA grant of School of Physics and Engineering of ITMO University.

For citation: Kozhina A. D., Tsyganok E. A. Development of high-aperture microscope objectives with an enlarged field of view and image recording on CCD detectors. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 575—580 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-575-580.

Введение. Одним из основных приборов, применяемых при исследовании биоматериала, является световой микроскоп для биологических исследований. В процессе его использования оператору приходится сменить несколько объективов для наблюдения предмета исследования с разными оптическими характеристиками. Объективы малого увеличения и малой числовой апертуры используются для наблюдения в широком поле зрения и поиска „аномалии“ в биоматериале. Обычно к ним относят объективы с увеличением $1\text{--}4\times$ и линейным полем зрения от 2 мм с апертурой не более 0,3. Объективы большого увеличения и высокой апертуры необходимы для детального рассмотрения „аномалии“ в биоматериале. К ним относят объективы, имеющие числовую апертуру более 0,5. Их линейное увеличение выше $40\times$, а линейное поле зрения менее 1 мм.

Целью статьи является усовершенствование световых микроскопов, регистрирующих изображения на ПЗС-приемниках, обеспечивая работу без временных затрат на перефокусировку оптики, что достигается высокоапертурными объективами с увеличенным полем зрения.

Одним из направлений использования биологического микроскопа является исследование клеток крови и выявление разных возбудителей болезней [1—4]. Размеры некоторых объектов представлены в табл. 1 [2—4].

Таблица 1

Исследуемый объект	Размер объекта, мкм
Клетки крови	
Эритроциты	6—9
Тромбоциты	2—5
Лейкоциты	
Нейтрофилы	10—15
Эозинофилы	12—17
Базофилы	9—12
Лимфоциты	6—18
Моноциты	18—20
Возбудители болезней	
Малярия (лат. <i>Plasmodium</i>)	2—3
Спирохеты (лат. <i>Spirochaetales</i>)	Длина 3—500, толщина 1,5
Трипаносомы (лат. <i>Trypanosoma</i>)	12—40
Микрофилярии (лат. <i>Onchocercidae</i>)	13—207

Современные объективы биологических микроскопов, представленные на рынке, работают либо с широким полем зрения, либо с высокой числовой апертурой [5—9]. Зачастую у современных объективов при апертуре свыше 0,5 линейный размер поля зрения в пространстве предметов составляет доли миллиметра. Этого недостаточно для корректного анализа биоматериала. У объективов, линейное поле зрения в пространстве предметов которых составляет не менее 2 мм, числовая апертура не превышает 0,3. Этого не всегда достаточно для корректного анализа биоматериала.

Кроме биологических микроскопов для исследования биоматериала используют зом-микроскопы. Они обеспечивают плавное изменение увеличения. Существуют комплексные модели типа ZEISS Axio Zoom.V16 [10—12]. В зависимости от выбранного увеличения микроскоп дает возможность рассматривать предметы размером от 1,25 до 20 мм. В стандартную комплектацию прибора входит объектив, позволяющий рассматривать объекты при числовой апертуре 0,25 и линейном поле зрения 1,25 мм при максимальном увеличении. Использование дополнительного объектива позволит работать при числовой апертуре 0,5 и линейном поле зрения 1,5 мм (при максимальном увеличении). Однако дополнительный объектив, весящий порядка 1,5 кг, не входит в комплект поставки. При этом сам микроскоп в минимальной комплектации имеет массу более 22 кг [10], что снижает возможность транспортировки прибора.

Более простые зом-микроскопы типа Микромед MC-5-ZOOM [13] и Levenhuk ZOOM 1T [14] хоть и обладают широким полем зрения, имеют низкое разрешение из-за большого рабо-

чего расстояния (свыше 100 мм). В среднем их поле зрения в зависимости от используемого увеличения составляет от 4 до 20 мм.

Проектирование оптической системы объектива микроскопа. Сложность разработки высокоапертурных объективов микроскопов обусловлена необходимостью коррекции наиболее влияющих aberrаций, связанных с высокой апертурой (сферическая aberrация, кома и сферохроматизм) [15]. При увеличении поля зрения возникает необходимость коррекции полевых aberrаций (кома, астигматизм, кривизна) [1, 16]. Кроме того, расширение поля зрения приведет к увеличенным диаметрам линз, это, в свою очередь, приведет к невозможности изготовления компонентов с большой оптической силой (из-за малости радиусов), которые необходимы в высокоапертурных объективах микроскопов.

В качестве базовой используется схема, включающая фронтальную и масштабно-компенсационную части с параллельным ходом луча между ними (рис. 1). Использование этой схемы позволяет получить необходимое увеличение оптической системы с помощью соотношения задних фокусных расстояний фронтальной и масштабно-компенсационной частей оптической системы. Для обеспечения широкого поля зрения и сохранения небольших габаритов приборов было выбрано увеличение $4\times$, соответствующее одному из стандартных увеличений микрообъективов.

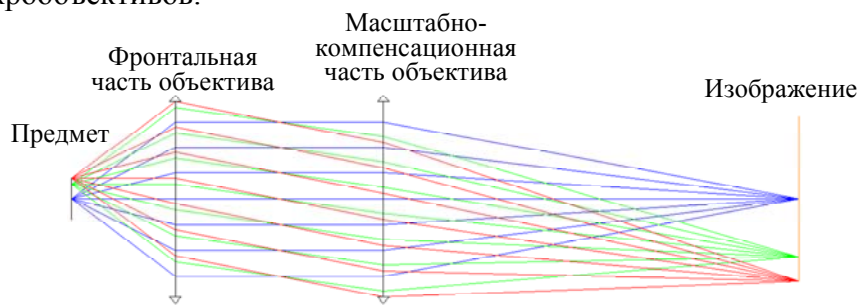


Рис. 1

Основная задача фронтальной части оптической системы объектива микроскопа — собрать лучи и уменьшить угол апертурного луча для последующих компонентов. С этой целью использовалась пара менисков. После уменьшения апертурного угла парой менисков компоненты оптической системы были рассчитаны по ходу первого параксиального луча через оптическую систему [17] для коррекции наиболее влияющих aberrаций: сферической aberrации, комы и хроматических aberrаций. Масштабно-компенсационная часть объектива используется для дополнительной коррекции aberrаций, связанных с высокой апертурой, и коррекции полевых aberrаций.

Рассчитанная схема (рис. 2) имеет числовую апертуру 0,5, линейное поле зрения 2 мм, увеличение $4\times$. Длина рассчитанной оптической системы не превышает 100 мм. Рабочее расстояние — от верхней поверхности покровного стекла до оправы первой линзы объектива — составляет 1,1 мм. В данной схеме не используются стекла с аномальным ходом дисперсии и кристаллы.

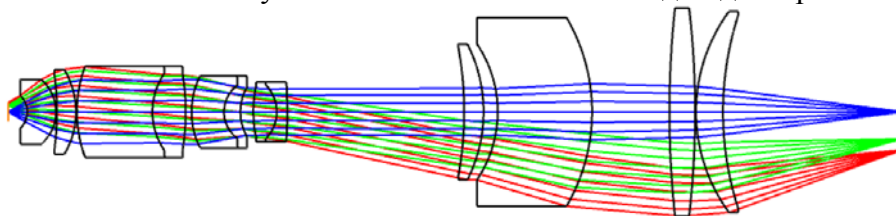


Рис. 2

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) системы представлена на рис. 3 (черная кривая — ЧКХ дифракционного изображения, синяя — ЧКХ осевой точки поля, красные — ЧКХ на краю поля зрения). Видно, что на осевой точке и в точке поля $y = 0,707y_{\max}$ (зеленые кривые; зеленая и красная сплошные кривые — меридиональная плоскость, пунктирные — сагиттальная) достигнуто качество, близкое к дифракционному. Качество на крайней точке поля значительно

ниже, однако оно достаточно для того, чтобы заметить интересующий нас объект и впоследствии переместить столик микроскопа в центр с целью его детального рассмотрения.

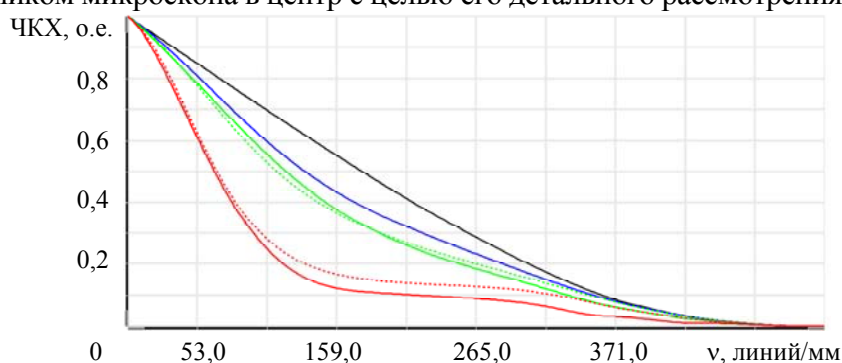


Рис. 3

Для обеспечения наилучшего качества изображения оптимальным будет использование матрицы 1/2" (диагональ 8 мм) с размером пиксела не более $2,4 \times 2,4$ мкм.

Анализ допусков. Для анализа допусков использован метод Монте-Карло. В табл. 2 приведены значения допусков и количество элементов или поверхностей, на которые они назначаются. Наиболее жесткие допуски накладываются на фронтальную часть микрообъектива, что объясняется высокими оптическими силами и, как следствие, малыми радиусами. Тем не менее, можно сказать, что требуемые допуски на изготовление оптических элементов приемлемы для микрообъективов.

Таблица 2

Параметр	Значение допуска	Число элементов (промежутков, поверхностей)
Допуск на общую ошибку, колец	1	5
	2	4
	3	12
Допуск на местную ошибку, колец	0,2	1
	0,3	20
Допуск на толщину оптических элементов, мм	0,002	1
	0,003	2
	0,005	1
	0,01	1
	0,03	2
	0,05	4
	0,1	1
Допуск на децентрировку поверхностей, мм	0,001	3
	0,002	6
	0,005	2
	0,01	3
	0,02	1
	0,03	6
Допуск на толщину воздушных промежутков, мм	0,003	1
	0,005	1
	0,01	1
	0,02	1
	0,03	1
	0,05	3
Допуск на децентрировку элементов, мм	0,002	3
	0,005	2
	0,01	1
	0,02	3
Допуск на наклон элементов, ...'	1	2
	3	6
	5	1

Заключение. Прибор, содержащий разработанный высокоапертурный объектив микроскопа с увеличенным полем зрения, обеспечит возможность наблюдения биологического образца без использования дополнительных объективов. Это позволит отказаться от перефокусировки, требующейся при смене объективов из-за падения глубины резкости.

Высокоапертурный объектив микроскопа не содержит стекол с аномальным ходом дисперсии и кристаллов. Он работает совместно с матричным ПЗС-приемником изображения, имеет линейное поле зрения в пространстве предметов не менее 2 мм, числовую апертуру в пространстве предметов не менее 0,5 и увеличение не менее $4\times$. Для осевой точки поля разрешающая способность составляет порядка 0,8 мкм и порядка 2,4 мкм — для крайних точек изображения. Данный объектив имеет приемлемые допуски на изготовление и сборку оптических компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andreev L. N., Tsyganok H. A., Kozhina A. D., Soshnicova J. B. Microlens design to explore biological tissues for parasitic diseases identification // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11548. DOI: 10.1117/12.2573711.
2. Байгишиева Н. Д., Багомедова Н. В., Байгишиева А. А. Фенотипические проявления сочетания серповидноклеточной анемии с альфа-талассемией // Вестник Ивановской медицинской академии. 2019. Т. 24, № 1. С. 47—50.
3. Войцеховская И. В., Козлова И. В., Сунцова О. В., Лусак О. В., Дорощенко Е. К., Джиев Ю. П. Циркуляция *Borrelia miyamotoi* в природных очагах Прибайкалья // Изв. Иркутского государственного университета. Сер. Биология. Экология. 2014. № 8. С. 56—65.
4. Мусыргалина Ф. Ф. Медицинская паразитология: учеб. пособие. Уфа: Изд-во ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2018. 279 с.
5. High Performance ZEISS Objectives for Microscopy [Электронный ресурс]: <<https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/microscope-components/objectives.html>>.
6. Thorlabs. Объективы для микроскопов [Электронный ресурс]: <<https://azimp.ru/thorlabs/microscope-objectives>>.
7. Frolov D. N., Vinogradova O. A., Frolov V. N. Optical design and unification of objectives: CCF PlanApo for 28 mm observation in the microscope // Proc. SPIE. Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications. 2018. Vol. 106791G. DOI: 10.1117/12.2306504.
8. Frolov D. N., Vinogradova O. A., Wen L., Jing F. Optical design of budget objectives for mass production microscopes // Proc. SPIE. Optoelectronic Devices and Integration VII. 2018. Vol. 10814. DOI: 10.1117/12.2500425.
9. Frolov D. N., Vinogradova O. A., Frolov V. N., Vakulov P. S. Optical design and unification of optical systems of objectives formicroscopes // Proc. SPIE. Optical Design and Engineering VII. 2018. Vol. 10690. DOI: 10.1117/12.2311799.
10. ZEISS Axio Zoom.V16 for Biology [Электронный ресурс]: <<https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/stereo-zoom-microscopes/axio-zoom-v16.html>>.
11. Hoegele A., Winterot J. Afocal zoom lenses and their applications // Proc. SPIE. Zoom Lenses IV. 2012. Vol. 8488.
12. Hoegele A. Afocal zoom lenses for stereo surgical microscopes // Proc. SPIE. Zoom Lenses VI. 2019. Vol. 11106.
13. Микроскоп Микромед MC-5-ZOOM LED [Электронный ресурс]: <https://micromed-spb.ru/products/stereomikroskopy/Mikroskop-Mikromed-MS_5_ZOOM-LED>.
14. Levenhuk ZOOM 1T Trinocular Microscope [Электронный ресурс]: <<https://www.levenhuk.com/catalogue/microscopes/levenhuk-zoom-1t/#.YLkTjFAmzcc>>.
15. Andreev L. N., Ezhova V. V., Tsyganok E. A., Kozhina A. D. Compensators of Petzval field curvature and astigmatism // Journal of Optical Technology. 2021. Vol. 88, N 4. P. 175—177.
16. Andreev L. N., Tsyganok H. A., Ezhova V. V., Kozhina A. D. Design of compensators for microscope lens // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11548. P. 115480C.

17. Слюсарев Г. Г. Методы синтеза оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975.

Сведения об авторах

- Анастасия Дмитриевна Кожина** — аспирант; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: adkozhina@itmo.ru
- Елена Анатольевна Цыганок** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; доцент; E-mail: llenal@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.22; одобрена после рецензирования 24.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

- Andreev L.N., Tsyganok H.A., Kozhina A.D., Soshnicova J.B. *Proc. of SPIE*, 2020, vol. 11548, DOI: 10.1117/12.2573711.
- Baigishieva N.D., Bagomedova N.V., Baigishieva A.A. *Bulletin of the Ivanovo Medical Academy*, 2019, no. 1(24), pp. 47–50. (in Russ.)
- Voitsekhovskaya I.V., Kozlova I.V., Suntsova O.V., Lisak O.V., Doroshchenko E.K., Dzhioev Yu.P. *News of the Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology*, 2014, no. 8, pp. 56–65. (in Russ.)
- Musyrigalina F.F. *Meditsinskaya parazitologiya* (Medical Parasitology), Ufa, 2018, 279 p. (in Russ.)
- High Performance ZEISS Objectives for Microscopy*, <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/microscope-components/objectives.html>.
- <https://azimp.ru/thorlabs/microscope-objectives/>. (in Russ.)
- Frolov D.N., Vinogradova O.A., Frolov V.N. *Proc. SPIE, Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications V*, 2018, vol. 10679, doi: 10.1117/12.2306504.
- Frolov D.N., Vinogradova O.A., Wen L., Jing F. *Proc. SPIE, Optoelectronic Devices and Integration VII*, 2018, vol. 10814, DOI: 10.1117/12.2500425.
- Frolov D.N., Vinogradova O.A., Frolov V.N., Vakulov P.S. *Proc. SPIE, Optical Design and Engineering VII*, 2018, vol. 10690, DOI: 10.1117/12.2311799.
- ZEISS Axio Zoom.V16 for Biology, <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/stereo-zoom-microscopes/axio-zoom-v16.html>.
- Hoegeler A., Winterot J. *Proc. SPIE, Zoom Lenses IV*, 2012, vol. 8488.
- Hoegeler A. *Proc. SPIE, Zoom Lenses VI*, 2019, vol. 11106.
- https://micromed-spb.ru/products/stereomikroskopy/Mikroskop-Mikromed-MS_5_ZOOM-LED/. (in Russ.)
- Levenhuk ZOOM 1T Trinocular Microscope, <https://www.levenhuk.com/catalogue/microscopes/levenhuk-zoom-1t/#.YLkTjFAMzcc>.
- Andreev L.N., Ezhova V.V., Tsyganok E.A., Kozhina A.D. *Journal of Optical Technology*, 2021, no. 4(88), pp. 175–177.
- Andreev L.N., Tsyganok H.A., Ezhova V.V., Kozhina A.D. *Proceedings of SPIE*, 2020, Vol. 11548, pp. 115480C.
- Slyusarev G.G. *Metody sinteza opticheskikh sistem* (Methods for the Synthesis of Optical Systems), Leningrad, 1975. (in Russ.)

Data on authors

- Anastasiya D. Kozhina** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: adkozhina@itmo.ru
- Elena A. Tsyganok** — PhD; ITMO University, Faculty of Engineering Research; Associate Professor; E-mail: llenal@mail.ru

Received 30.04.22; approved after reviewing 24.05.22; accepted for publication 21.06.22.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

УДК 62-52
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-581-584

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЗАДИРА ФИЛАМЕНТА В УСТРОЙСТВАХ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

П. С. ТОПОРКОВ*, Ю. В. ФЕДОСОВ, М. Я. АФАНАСЬЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
**toporkov@idtsoft.ru*

Аннотация. Проанализирована проблема задира филамента в устройствах трехмерной печати, проведен обзор существующих решений и предложен оригинальный способ автоматического обнаружения задира. Предложенный способ автоматизации детектирования задира филамента в устройствах трехмерной печати может обеспечить экономию материала, сохранность оборудования, снижение временных затрат на переналадку и починку устройств за счет своевременного прекращения аварийного процесса, что в результате гарантирует стабильность и надежность производственной технологии.

Ключевые слова: быстрое макетирование (прототипирование), автоматизация производства, управление технологическим оборудованием, трехмерная печать, филамент, горячая часть

Ссылка для цитирования: Топорков П. С., Федосов Ю. В., Афанасьев М. Я. Автоматическое детектирование задира филамента в устройствах трехмерной печати // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 581—584. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-581-584.

AUTOMATIC DETECTION OF FILAMENT BURR IN THREE-DIMENSIONAL PRINTING DEVICES

P. S. Toporkov*, Yu. V. Fedosov, M. Ya. Afanasyev

ITMO University, St. Petersburg, Russia
**toporkov@idtsoft.ru*

Abstract. The problem of filament burr in 3D printing devices is analyzed, a review of existing solutions is carried out, and an original method for automatic detection of scoring is proposed. The proposed method for automating the detection of filament burr in 3D printing devices can provide material savings, equipment safety, and reduce time spent on readjustment and repair of devices due to the timely termination of the emergency process, which as a result guarantees the stability and reliability of the production technology.

Keywords: rapid prototyping (prototyping), production automation, process equipment control, three-dimensional printing, filament, hot part

For citation: Toporkov P. S., Fedosov Yu. V., Afanasyev M. Ya. Automatic detection of filament burr in three-dimensional printing devices. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 581—584 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-581-584.

Введение. Современный принтер трехмерной печати обычно состоит из корпуса, закрепленных на нем направляющих, по которым с помощью шаговых двигателей перемещается печатающая головка, а также рабочего стола, на котором послойно печатается („выращивается“) изделие. Шаговые двигатели управляются при помощи электронных средств. То, чем

печатает 3D-принтер, т.е. расходные материалы для него, представляют собой расплавляемые в головке термопластиковые нити или прутки (*филаменты*), которые поступают пользователю на катушках или в рулонах.

Одним из основных компонентов принтера трехмерной печати, в котором выполняются расплавление филамента и подача расплавленной нити полимера, является печатающая головка. Важной ее частью является экструдер — узел, захватывающий филамент и проталкивающий его в другую, нагреваемую часть головки — горячую часть.

Горячая часть головки обычно состоит из трех элементов:

- собственно головка, сопло;
- термобарьер (может быть выполнен заодно с радиатором);
- радиатор.

Возникающие задиры и последующее измельчение филамента в устройствах трехмерной печати приводят к нежелательным последствиям: заклинивание головки, застревание рабочего материала, повреждение и засорение механизма экструдера и др., а в результате — вынужденное прерывание рабочего процесса и связанные с ним временные потери. Это не единственная проблема, которая может возникнуть в процессе трехмерной печати, но ее решение является первоочередным по следующим соображениям. Задир на пластике приводит к недоподаче филамента и перегреву горячей части вследствие подачи меньшего объема материала в единицу времени, заклиниванию механизма, низкому качеству печати, непропечатыванию или недостаточно плотному пропечатыванию детали. Кроме того, задир требует наиболее ресурсоемких процедур по ликвидации последствий работы принтера с истертым филаментом. Например, вследствие недоподачи материала и перегрева горячей части может возникнуть как закоксовывание материала в сопле, так и невозможность обеспечения требуемого температурного режима печати. В этом случае придется чистить сопло и перепечатывать деталь заново. При прочистке сопла высока вероятность нарушения калибровки. Соответственно, принтер необходимо повторно калибровать. Также недоподача материала приводит к короблению объекта и его недостаточному заполнению. Конкретного исследования по маркам материалов в литературе не приводится, однако можно утверждать, что такая проблема существует практически для любых термопластов. Указанные в [1—5] решения можно свести к правильной предварительной настройке принтера трехмерной печати.

Среди причин возникновения данного явления упоминаются быстрая или слишком сильная подача филамента, засорение сопла экструдера, нарушения температурного режима, дефекты трубки из политетрафторэтилена, некорректные значения скорости печати, слишком большое усилие давления шестерни экструдера, неверная калибровка и др.

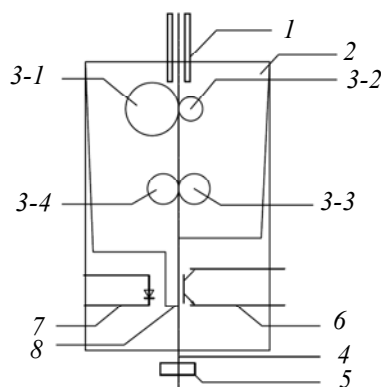
Вне зависимости от конкретной причины появления этой проблемы видится целесообразным автоматизировать ее выявление для того, чтобы своевременно остановить процесс печати, не дожидаясь выхода из строя всей установки, и иметь возможность оперативно скорректировать необходимые параметры с минимальными потерями для оборудования и для текущих производственных задач. Целью работы является поиск решения по подобной автоматизации.

Решение. Один из способов реализации подобной технологии — оптическое детектирование наличия стружки с последующей подачей аварийного сигнала для оперативного реагирования на потенциально нежелательную ситуацию и получения возможности ее избежать либо свести последствия к минимуму.

В [6] описана система управления экструдером, основанная на использовании камеры и инфракрасного датчика, которая значительно снижает величину проскальзывания. Но она не учитывает возможного появления стружки.

В [7] представлена имитационная модель, способная прогнозировать температуру и скорость экструдата. При этом приведены неполные данные о механике продвижения филамента; также не учтены возможное задира филамента и образование стружки.

Возможная схема осуществления детектирования приведена на рисунке. Через трубку 1 в головку 2 3D-принтера, оснащенную механизмом подачи филамента, состоящим из четырех зубчатых колес 3-1—3-4, поступает филамент 4. По пути следования к выходному соплу 5 филамент проходит через оптическое устройство детектирования, состоящее из фототранзистора 6, светодиода 7 и накопителя для стружки 8. В отсутствие повреждений филамента накопитель для стружки 8, представляющий собой полость в корпусе головки 2, пустует и за счет этого луч светодиода 7 свободно проходит через накопитель 8 и достигает фототранзистора 6, преобразующего оптический сигнал в электрический ток, установившееся значение которого является подтверждением нормального режима работы устройства. При возникновении задира филамента образуется стружка, которая постепенно наполняет накопитель и препятствует свободному прохождению луча от светодиода 7 к фототранзистору 6, за счет чего происходит изменение в выходном токе последнего, что сигнализирует о наличии проблемы.



Далее электрический сигнал может быть преобразован в звуковой или световой для оповещения оператора установки либо может быть передан на устройство автоматического останова, конкретная реализация которого является предметом отдельной проработки (например, в виде контроллера привода, на который подается соответствующий сигнал). В любой конфигурации предложенное решение достигает основной цели — прервать процесс трехмерной печати сразу же при появлении стружки, не дожидаясь выхода установки из строя или иных нежелательных последствий. После останова оператор имеет возможность осмотреть установку, определить причину возникновения проблемы и внести коррективы в настройки, чтобы продолжить процесс изготовления продукции в штатном режиме.

Заключение. Предложенный способ автоматизации детектирования задира филамента в устройствах трехмерной печати может обеспечить экономию материала, сохранность оборудования, снижение временных затрат на переналадку и починку устройств за счет своевременного прекращения аварийного процесса, что в результате гарантирует стабильность и надежность производственной технологии. Это составляет главные научно-технические итоги работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 3D Printer Extruder: Grinding Filament – How to Fix It [Электронный ресурс]: <<https://m.all3dp.com/2/3d-printer-grinding-troubleshooting/>>. (режим доступа 11.12.2021)
2. How to Prevent Jamming in All-Metal Hot Ends [Электронный ресурс]: <<https://all3dp.com/2/how-to-prevent-jamming-in-all-metal-hot-ends/>>. (режим доступа 11.12.2021)

3. Santana L., Alves J. L., Netto A. S. A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality // *Materials & Design*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.020>.
4. Sen Qian, Kunlong Bao, Bin Zi and Ning Wang. Kinematic Calibration of a Cable-Driven Parallel Robot for 3D Printing // *Sensors*. 2018. Vol. 18(9). P. 2898. <https://doi.org/10.3390/s18092898>.
5. García J. A., Lara E. and Aguilar L. A Low-Cost Calibration Method for Low-Cost MEMS Accelerometers Based on 3D Printing // *Sensors*. 2020. Vol. 20(22). P. 6454. <https://doi.org/10.3390/s20226454>.
6. Greeff G. P., Schilling M. Closed loop control of slippage during filament transport in molten material extrusion // *Additive Manufacturing*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.12.005>.
7. Moretti M., Rossi A., Senin N. In-process simulation of the extrusion to support optimisation and real-time monitoring in fused filament fabrication // *Additive Manufacturing*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101817>.

Сведения об авторах

- | | |
|-----------------------------------|---|
| Павел Сергеевич Топорков | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: toporkov@idtsoft.ru |
| Юрий Валерьевич Федосов | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: yf01@yandex.ru |
| Максим Яковлевич Афанасьев | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: myafanasyev@itmo.ru |

Поступила в редакцию 24.03.22; одобрена после рецензирования 15.04.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. *3D Printer Extruder: Grinding Filament – How to Fix It*, <https://m.all3dp.com/2/3d-printer-grinding-troubleshooting>.
2. *How to Prevent Jamming in All-Metal Hot Ends*, <https://all3dp.com/2/how-to-prevent-jamming-in-all-metal-hot-ends>.
3. Santana L., Alves J.L., Netto A.S. *Materials & Design*, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.020>.
4. Sen Qian, Kunlong Bao, Bin Zi and Ning Wang, *Sensors*, 2018, no. 9(18), pp. 2898, <https://doi.org/10.3390/s18092898>.
5. García J.A., Lara E. and Aguilar L. *Sensors*, 2020, no. 20(22), pp. 6454, <https://doi.org/10.3390/s20226454>.
6. Greeff G.P., Schilling M. *Additive Manufacturing*, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.12.005>.
7. Moretti M., Rossi A., Senin N. *Additive Manufacturing*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101817>.

Data on authors

- | | |
|----------------------------|--|
| Pavel S. Toporkov | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: toporkov@idtsoft.ru |
| Yury V. Fedosov | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: yf01@yandex.ru |
| Maxim Ya. Afanasyev | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: myafanasyev@itmo.ru |

Received 24.03.22; approved after reviewing 15.04.22; accepted for publication 21.06.22.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ
ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗНОСА ГРЕБНЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

К. С. ПЕТРОВ, Е. В. КОНДРАТЕНКО, В. В. ПЕТРОВ*

*Омский государственный университет путей сообщения Омск, Россия,
omgups@omgups.ru*

Аннотация. Рассмотрены два варианта устройства, содержащие по четыре или шесть малогабаритных магнитоиндукционных датчиков, закрепленных на подошве рельса. Устройство предназначено для диагностирования формы гребня колесных пар в процессе движения подвижного состава над датчиками по прямолинейному рельсовому пути. Предложен алгоритм вычисления параметров профиля гребней колесных пар, позволяющий идентифицировать координаты центра и радиус гребня, форма которого описывается уравнением второго порядка, т.е. модель вершины гребня имеет форму полукруга, соответствующего стандартному профилю колеса. Кроме того, реализован алгоритм тестирования адекватности полученной параметрической модели. Предложен алгоритм идентификации износа вертикального подреза гребней колесных пар на основе использования подходов, аналогичных методам инструментального контроля, с применением стандартных шаблонов, которые разработаны в соответствии со стандартом „Колеса цельнокатаные“. Предложенная математическая модель, описывающая процесс износа вертикального подреза гребня, позволяет автоматизировать диагностирование состояния профиля колесных пар при движении состава над трехточечной системой магнитоиндукционных датчиков и имитацию процедуры инструментального контроля параметров гребней колес. Алгоритмы, заложенные в предлагаемой математической модели и реализованные на основе микропроцессорного контроллера, позволяют автоматизировать процесс приборного контроля состояния гребней колес в режиме реального времени, вычислять и прогнозировать сроки технического обслуживания или необходимого ремонта колесных пар подвижного состава железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: математическая модель, форма вертикального подреза гребня, магнитоиндукционный датчик, алгоритм, диагностирование, подвижной состав, колесная пара, приборы, автоматизация

Ссылка для цитирования: Петров К. С., Кондратенко Е. В., Петров В. В. Разработка системы магнитоиндукционных датчиков для диагностирования износа гребней колесных пар подвижного состава // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 585—596. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-585-596.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF MAGNETIC INDUCTION SENSORS
FOR DIAGNOSING WEAR OF THE ROLLING STOCK WHEELSET CREST

K. S. Petrov, E. V. Kondratenko, V. V. Petrov*

*Omsk State Transport University, Omsk, Russia
omgups@omgups.ru

Abstract. Two variants of the device containing four or six small-sized magnetic induction sensors mounted on the sole of the rail are considered. The device is designed to diagnose the shape of the crest of rolling stock wheelsets during its movement over the sensors along a straight rail track. An algorithm for calculating the parameters of the profile of the wheelset ridge is proposed, which allows identifying the coordinates of the center and the radius of the ridge with the shape described by a second-order equation, i.e., the model of the crest tire has the shape of a semicircle corresponding to the standard wheel profile. In addition, an algorithm for testing the adequacy of the obtained parametric model is implemented. An algorithm for identifying the degree of wear of the

vertical undercutting of the ridges of the wheelsets is proposed based on the use of approaches similar to instrumental control methods, using standard templates specially developed in accordance with the State Standard "Solid Rolled Wheels". The proposed mathematical model describing the process of wear of the vertical undercutting of the ridge makes it possible to automate the procedure for diagnosing the state of the wheel pair profile during the movement of the train over the three-point system of magnetic induction sensors and simulating the procedure for instrumental control of the wheel crest parameters. The algorithms embedded in the proposed mathematical model and implemented on the basis of a microprocessor controller allow automating the process of instrument monitoring of the condition of wheel ridges in real time, calculating and predicting the timing of maintenance or necessary repair of wheel sets of railway transport rolling stock.

Keywords: mathematical model, shape of vertical crest undercut, magnetic induction sensor, algorithm, diagnostics, rolling stock, wheelset, instruments, automation

For citation: Petrov K. S., Kondratenko E. V., Petrov V. V. Development of a system of magnetic induction sensors for diagnosing wear of the rolling stock wheelset crest. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 585—596 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-585-596.

За последние несколько десятков лет в России произошли экономические и технические изменения в процессе эксплуатации колесных пар на железной дороге: переход на подшипники качения, увеличение осевой нагрузки, применение композиционных тормозных колодок, железобетонных шпал и т.д. Все перечисленные факторы спровоцировали увеличение износа колес и рельсов, а также снижение усталостной прочности колес и контактно-усталостной прочности поверхности обода.

Ежегодно на железных дорогах России отцепляют большое количество единиц подвижного состава из-за неисправности колесной пары. На некоторых участках сети железных дорог интенсивность изнашивания возросла в 3—6 раз по сравнению с нормами эксплуатации подвижного состава.

Образование дефектов на поверхности катания колесных пар влечет за собой отказ в эксплуатации единицы подвижного состава, что увеличивает их простой и ведет к экономическим издержкам. Следовательно, локализуя возникающие дефекты железнодорожных колес, возможно повысить надежность безопасной эксплуатации подвижного состава.

Анализ неисправностей подвижного состава (на примере грузовых вагонов в текущем отцепочном ремонте — ТР-2) показывает, что наиболее распространенной причиной отцепки вагонов являются дефекты колесной пары (рис. 1).

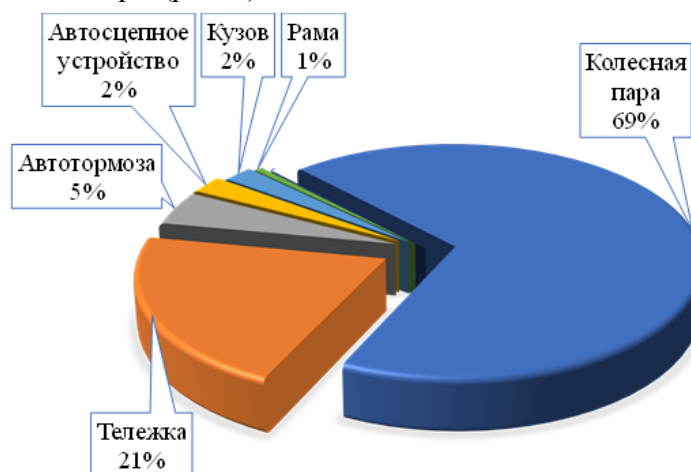


Рис. 1

На основе отчета о работе приборов безопасности, используемых на пункте технического обслуживания вагонов (ПТО) ст. Инская Западно-Сибирской железной дороги, за 2016—2021 гг. был проведен анализ, позволяющий оценить долю неисправных колесных пар d в проконтролированных вагонах (рис. 2).

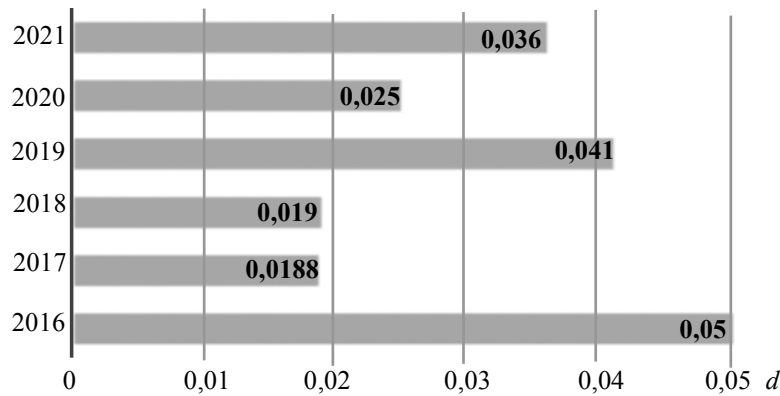


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что за последние пять лет доля всех отцепов подвижного состава снижается. Эта тенденция обусловлена внедрением современных методов увеличения ресурса колесных пар путем использования цельнокатаных колес нового поколения с S-образным диском, кассетных подшипников, а также повышения уровня точности применяемых диагностических комплексов подвижного состава в ходе движения (КТИ, КТСМ и др.).

На рис. 3 проиллюстрировано процентное соотношение отцепов вагонов по показаниям приборов технического диагностирования за 2016—2021 гг. на ПТО ст. Инская Западно-Сибирской железной дороги. Согласно рисунку, можно выделить пять групп неисправности:

- утончение гребня (менее 25 мм);
- дефекты поверхности катания колеса (ползун, прокат, выщербина и т.д.);
- сдвиг (сползание) буксового узла (более 2 мм);
- утончение обода колеса (менее 22 мм);
- разница в толщине гребней колес в одной колесной паре (более 4 мм).

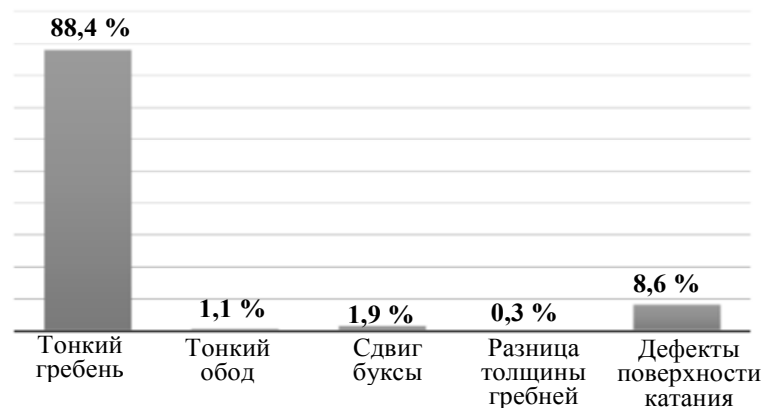


Рис. 3

Анализ неисправностей цельнокатаного колеса в эксплуатации (рис. 3) свидетельствует о высоком уровне дефектообразования гребня. Повышенный износ главным образом возникает вследствие постоянного взаимодействия гребня с рельсом при извилистом движении на ровных участках железнодорожного пути и прохождении колесной пары кривых, особенно малого радиуса скругления. Доля отцепления вагонов вследствие износа гребня колеса, согласно статистике ПТО ст. Инская, представлена на рис. 4.

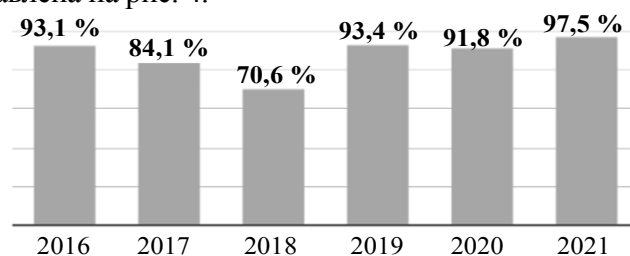


Рис. 4

Отклонение толщины гребня от номинальных значений приводит к дополнительному деформированию рельсового пути и подвижного состава, например, ослаблению креплений частей стрелочного перевода на шпалах, раннему износу гребня колеса. Утончение гребня колеса способствует возникновению трещин и сколов, что повышает вероятность схода подвижного состава в ходе эксплуатации.

По данным приборов технического диагностирования, расположенных на ПТО ст. Инская Западно-Сибирской железной дороги, проанализирована зависимость доли зарегистрированных случаев утончения гребня колеса от месяца года — выявлена корреляция повышенного деформирования и среднесуточной температуры окружающей среды (рис. 5).

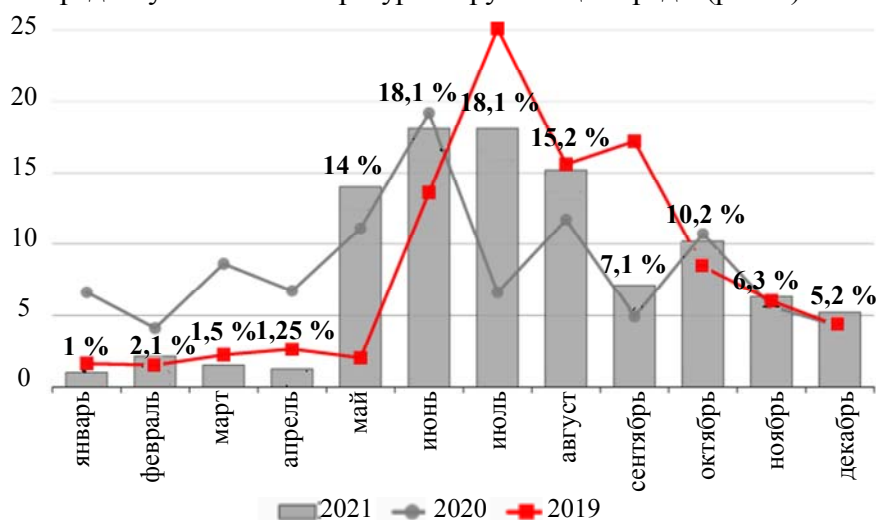


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что наибольшая интенсивность истирания гребня приходится на летние месяцы, когда средняя температура окружающей среды выше 25 °С. Это связано с повышенным уровнем образования абразивных веществ (таких как песок, пыль, мелкие части перевозимых грузов) в системе взаимодействия колесо—рельс. В весенний и осенний периоды сокращение износа гребня сопряжено с увеличением уровня осадков — своего рода смазочного материала, снижающего силы трения между колесом и рельсом.

Автоматизация процесса диагностирования состояния колесных пар на основе современной микропроцессорной техники позволяет существенно повысить оперативность принятия решения о соответствии их эксплуатационным требованиям и является важным этапом в технологическом процессе обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта [1]. Наиболее надежные системы автоматизации контроля профиля гребней колесных пар подвижного состава основаны на применении системы магнитоиндукционных датчиков, закрепленных на подошве рельса с внутренней стороны прямолинейного участка железнодорожного пути [2, 3]. При этом следует учитывать, что основным достоинством магнитоиндукционных датчиков (по сравнению с оптическими и лазерными) является высокая надежность их работы в сложных погодных условиях и незначительные энергетические и эксплуатационные затраты.

Для активного внедрения современных цифровых и компьютерных технологий на железнодорожном транспорте необходимы специальные математические модели, обеспечивающие решение поставленных задач в области автоматизации и прогнозирования [4]. Основная задача настоящей работы состоит в создании линейной математической модели, описывающей изменение формы вертикального подреза гребней колесных пар для автоматизации диагностирования их износа в процессе движения состава по рельсовому пути и разработке алгоритма идентификации формы гребней колесных пар, аналогичного алгоритму метода инструментального контроля, основанного на применении шаблонов.

В [5] предлагается использовать амплитудные значения сигналов датчиков для оценки толщины гребня колеса и его смещения относительно головки рельса, основанные на эквивалентной прямоугольной форме модели гребня. Недостаток такой двухточечной модели заключается в том, что расстояние между поверхностью гребня колеса, имеющей эквивалентную прямоугольную форму, и плоскостью датчиков считается постоянным, а измеряется только смещение гребня колеса относительно датчиков, что вызывает дополнительную методическую погрешность, которая приводит к нелинейности реальной функции чувствительности датчика. Для устранения этого недостатка предлагается использовать трехточечную систему магнитоиндукционных датчиков, установив два дополнительных датчика. Таким образом, в этой системе используется подход, аналогичный [6]: реализуется астигматическая модель второго порядка, которая позволяет идентифицировать объект, описываемый уравнением второй степени (в этом случае модель вершины гребня имеет форму полукруга).

Типичная схема расположения магнитоиндукционных датчиков для реализации двухточечной системы, содержащей четыре информационных датчика (Д1—Д4) и два датчика Дч, Дн (для фиксации четного и нечетного направления приближения состава), представлена на рис. 6, а. Схема расположения магнитоиндукционных датчиков для реализации трехточечной системы, содержащей шесть датчиков (Д1—Д6), представлена на рис. 6, б.

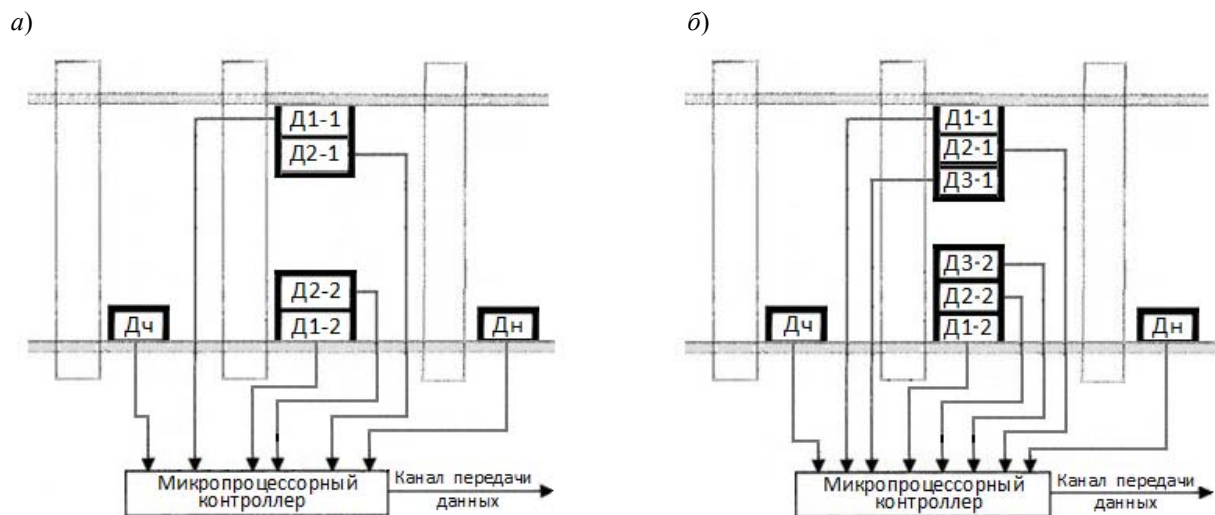


Рис. 6

В [7] предлагается использовать энергию импульсов на выходе магнитоиндукционных датчиков повышенной мощности Дч и Дн для зарядки аккумуляторной батареи, питающей микропроцессорный контроллер, входящий в состав системы. Это обеспечивает энергетическую независимость всей системы от внешних источников питания и снижение эксплуатационных затрат по принципу „установил и забыл“.

Первым признаком износа деталей, входящих в конструкцию тележки подвижного состава, является смещение гребня колеса относительно головки рельса, а перекося оси колесной пары и износ гребня (уменьшение его толщины) — это уже крайнее (предельное) техническое состояние колесной пары и тележки в целом. Поэтому для обеспечения возможности прогнозирования сроков технического обслуживания подвижного состава и износа деталей тележки необходимо оценивать не только смещение гребня в горизонтальном (по оси x) и вертикальном (по оси y) направлениях, но еще его толщину и форму, что позволяет реализовать трехточечную модель.

Предлагаемая математическая модель предполагает применение шаблонов в процессе инструментального контроля на пунктах технического обслуживания подвижного состава, она соответствует методике, утвержденной в ОАО „РЖД“ [8]. На рис. 7 представлены фрагмент профиля гребня колеса (а; звездочкой обозначены справочные размеры) и тестового шаблона (б)

для контроля его состояния, соответствующие ГОСТ „Колеса цельнокатанные“^{с*}.

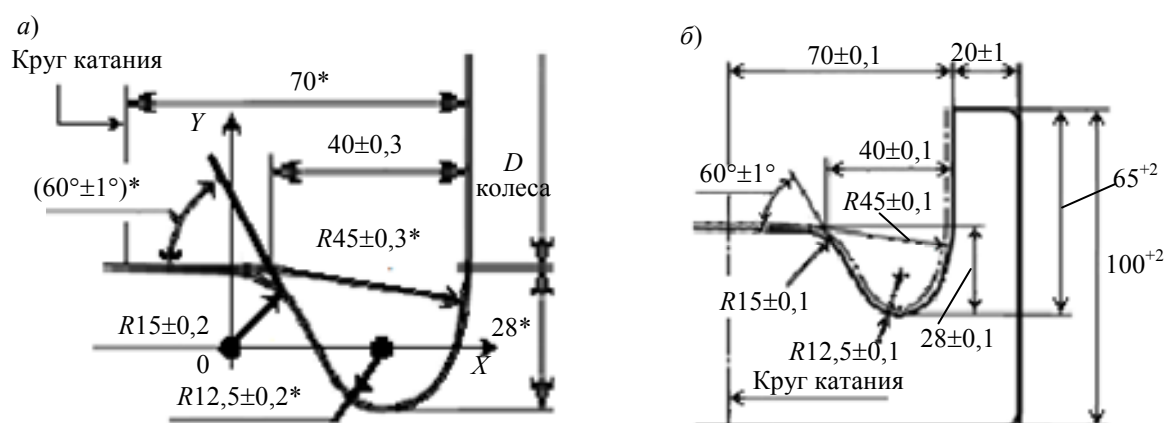


Рис. 7

Эквивалентная геометрическая схема взаимного расположения гребня колеса и трех датчиков Д1, Д2, Д3 в прямоугольной системе координат, используемая в процессе разработки математической модели, приведена на рис. 8.

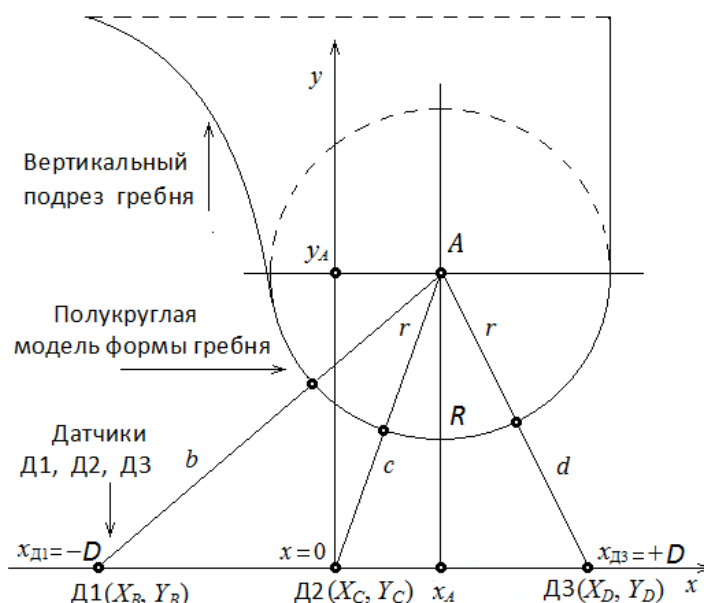


Рис. 8

Эквивалентный радиус гребня колеса [9] с применением трехточечной модели системы датчиков находится как:

$$r = \frac{2D^2 + 2c^2 - d^2 - b^2}{2b + 2d - 4c}; \quad (1)$$

координата x_A эквивалентной окружности гребня колеса в данной трехточечной модели:

$$x_A = \frac{(b+r)^2 - (d+r)^2}{4D}. \quad (2)$$

Вторая координата центра эквивалентной окружности гребня вычисляется согласно выражению

* ГОСТ 10791-11. Колеса цельнокатанные. М.: Стандартинформ, 2011. 32 с.

$$y_A = \sqrt{(c+r)^2 - x_A^2}. \quad (3)$$

Для тестирования алгоритма (1)—(3) вычисления радиуса гребня (r) и координат центра эквивалентной окружности гребня $A(x_A, y_A)$ предварительно необходимо найти значения b, c, d при заданных постоянных координатах датчиков Д1 (X_B, Y_B), Д2 (X_C, Y_C), Д3 (X_D, Y_D) и попарно варьируемых соответствующих параметрах окружности (R, X_A, Y_A) в пределах рабочего диапазона изменения этих величин:

$$\begin{cases} b = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} - R; \\ c = \sqrt{(X_A - X_C)^2 + (Y_A - Y_C)^2} - R; \\ d = \sqrt{(X_A - X_D)^2 + (Y_A - Y_D)^2} - R. \end{cases} \quad (4)$$

Значения b, c, d , вычисленные по формулам (4), необходимо подставить в выражения (1)—(3) для нахождения параметров (r, x_A, y_A). Так как алгебраические преобразования после указанных подстановок весьма громоздки, то вместо дальнейшего аналитического исследования модели проще воспользоваться численными методами (в любой доступной среде программирования). В результате получим тождественные функциональные зависимости в пределах допустимого диапазона изменения этих величин:

$$\begin{cases} r(X_A, Y_A) = R(X_A, Y_A); \\ x_A(R, Y_A) = X_A(R, Y_A); \\ y_A(R, X_A) = Y_A(R, X_A). \end{cases} \quad (5)$$

Результат тестирования (5) подтверждает корректность алгоритма при вычислении параметров гребня колеса на основе импульсных сигналов, поступающих от системы трех магнитоиндукционных датчиков, находящихся на расстоянии D друг от друга (см. рис. 8).

Согласно классификатору неисправностей колесных пар [8] и методике диагностирования состояния профиля колес [10], износ вертикального подреза гребня контролируется с помощью шаблона, применение которого продемонстрировано на рис. 9 (a — размеры шаблона, учитываемые в модели; b — пример взаимного расположения предельного износа гребня колеса и шаблона для моделирования системы).

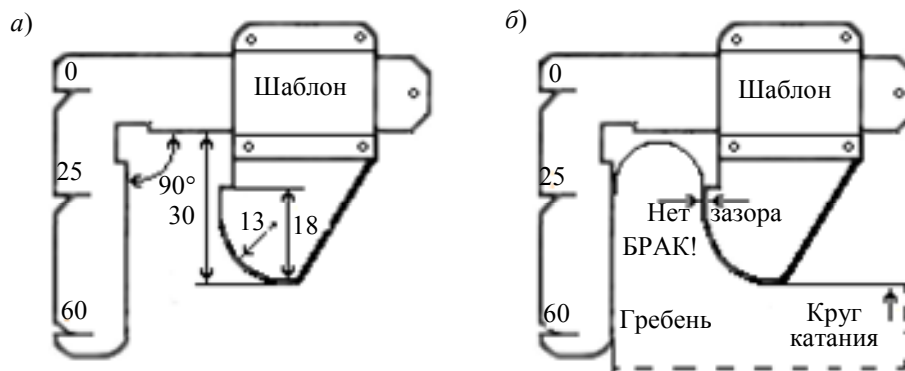


Рис. 9

Эквивалентная геометрическая схема модели взаимного расположения гребня колеса и тестового шаблона R_h круговой формы (для оценки степени износа вертикального подреза гребня колеса) изображены на рис. 10 в принятой прямоугольной системе координат.

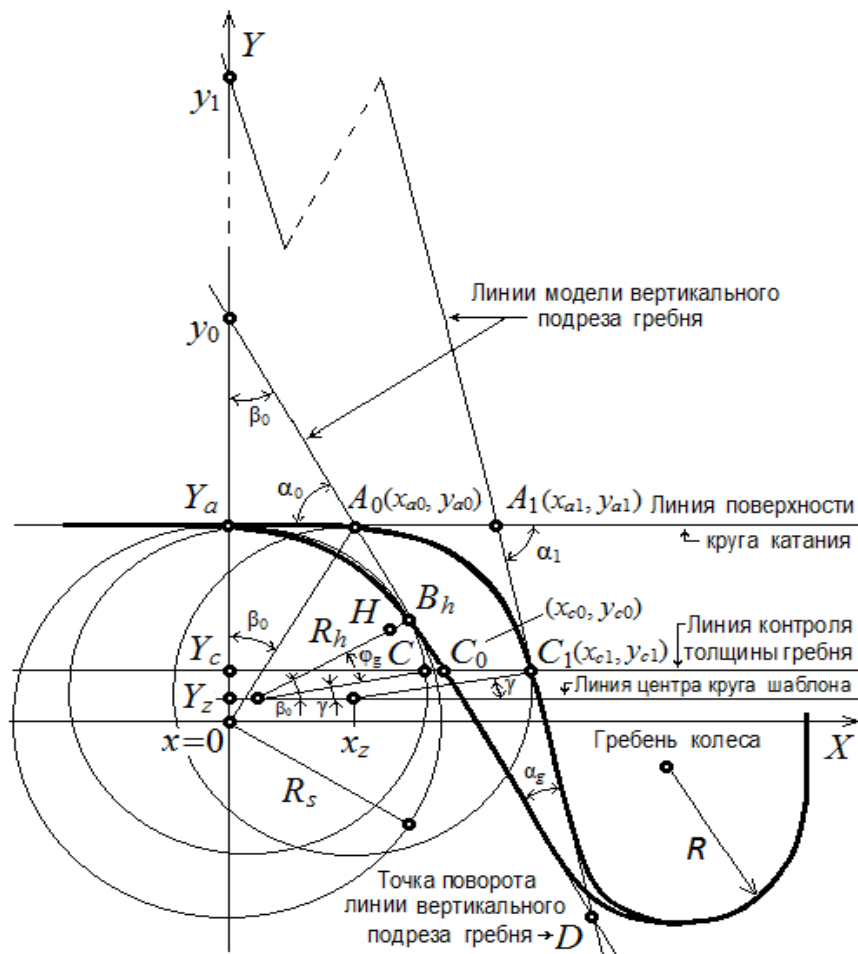


Рис. 10

Применение модели рассмотрим на примере стандартного профиля обода колеса. Для разработки модели воспользуемся методами аналитической геометрии. За начало системы координат принят центр окружности R_s , который определяет форму вертикального подреза при нормативном состоянии стандартного профиля колеса, совпадающего с шаблоном, предназначенным для инструментального контроля профиля, соответствующего ГОСТ „Колеса цельнокатанные“. Назначение постоянных параметров модели, изображенной на схеме (см. рис. 10) в принятой системе координат, описано в таблице.

Угол между линией наклона вертикального подреза A_0C_0 и осью Y при нормативном состоянии гребня и $\alpha_0 = 60^\circ$, соответствующего ГОСТ, определяется как

$$\beta_0 = \frac{\pi}{2} - \text{abs}(\alpha_0). \quad (6)$$

Координата x_{a0} точки A_0 пересечения прямой A_0C_0 с образующей линией поверхности катания (т.е. $y_{a0} = Y_a$) в принятой системе координат определяется как

$$x_{a0} = R_s \cdot \text{tg}\beta_0. \quad (7)$$

Коэффициент наклона прямой A_0C_0 к образующей линии поверхности катания (Y_a):

$$K_0 = \text{tg}\alpha_0. \quad (8)$$

Координата точки пересечения прямой A_0C_0 с осью Y при $y_{a0} = Y_a$ и $y_{c0} = Y_c$ (см. таблицу):

$$y_0 = y_{c0} - K_0 x_{c0}. \quad (9)$$

**Назначение исходных данных (констант),
обозначенных на эквивалентной геометрической схеме модели в принятой системе координат**

Обозначение	Значение	Исходные параметры модели в принятой прямоугольной системе координат
R_s	15 мм	Радиус окружности с координатами центра: $x = 0, y = 0$ (нормативное состояние вертикального подреза гребня колеса, соответствующего шаблону профиля)
R_h	13 мм	Радиус окружности с координатами центра: $x = x_z, y = Y_z$ (нормативное состояние параметров гребня, соответствующего шаблону для контроля вертикального подреза гребня)
α_0	-60°	Угол наклона линии вертикального подреза гребня, соответствующий параметрам стандартного профиля колеса при отсутствии износа
R	12,5 мм	Радиус окружности, описывающей форму вершины гребня колеса в нормативном состоянии стандартного профиля колеса при отсутствии износа
x_{c0}	14,66 мм	Координата точки C_0 пересечения линии контроля толщины гребня и линии вертикального подреза гребня, соответствующего параметрам профиля колеса при отсутствии износа (при этом $y_{c0} = Y_c$)
x_{c1}	21,66 мм	Координата точки C_1 пересечения линии контроля толщины гребня и линии вертикального подреза гребня, соответствующего состоянию предельного износа гребня колеса и запрету эксплуатации колесной пары (процесс износа толщины гребня определяется переменной x_g , которая изменяется при моделировании в диапазоне от x_{c0} до x_{c1})
Y_a	15 мм	Координата линии поверхности круга катания, по которой смещается шаблон, при инструментальном контроле состояния вертикального подреза гребня (примерно 28 мм от вершины гребня)
Y_c	5 мм	Координата линии контроля толщины гребня, которая используется при инструментальном контроле состояния вертикального подреза гребня (в стандарте указано 18 мм от вершины гребня)
Y_z	2 мм	Координата линии смещения центра эквивалентной окружности шаблона в процессе износа вертикального подреза гребня

Смещение центра эквивалентной окружности x_z шаблона R_h вдоль оси X в состоянии предельного износа вертикального подреза гребня находим при $y_z = Y_z$ из уравнения:

$$(x - x_z)^2 + (y - y_z)^2 = R_h^2. \quad (10)$$

Таким образом, смещение центра эквивалентной окружности шаблона R_h по линии Y_z :

$$x_z = x_{c1} - \sqrt{R_h^2 + (y_{c1} - y_z)^2}. \quad (11)$$

Коэффициент наклона радиуса окружности шаблона в точке C_1 (точка касания отрезка A_1C_1 и радиуса окружности R_h):

$$K_r = \frac{y_{c1} - y_z}{x_{c1} - x_z}. \quad (12)$$

Коэффициент наклона прямой A_1C_1 к оси X определим как перпендикуляр к радиусу в точке касания C_1 :

$$K_1 = -\frac{1}{K_r}. \quad (13)$$

Таким образом, коэффициент наклона прямой A_1C_1 к оси X , который соответствует предельному износу вертикального подреза гребня:

$$K_1 = -\frac{x_{c1} - x_z}{y_{c1} - y_z}. \quad (14)$$

Точка пересечения прямой A_1C_1 с осью Y при $y_{c1} = Y_c$ (см. таблицу):

$$y_1 = y_{c1} - K_1 x_{c1}. \quad (15)$$

Угол наклона γ радиуса окружности шаблона R_h в точке C_1 равен углу наклона γ в точке C , поскольку происходит параллельное смещение центра окружности R_h шаблона (по

линии Y_z) и точки C вдоль оси X (по линии Y_c) в процессе инструментального контроля степени износа вертикального подреза гребня, что наглядно видно (см. рис. 5):

$$\gamma = \operatorname{tg}^{-1} K_r. \quad (16)$$

Точку пересечения прямых A_0C_0 и A_1C_1 (точку D) найдем из системы уравнений

$$\begin{cases} y = K_0x + y_0; \\ y = K_1x + y_1. \end{cases} \quad (17)$$

В результате координата x_d точки D (пересечения двух прямых A_0C_0 и A_1C_1)

$$x_d = \frac{y_1 - y_0}{K_0 - K_1}. \quad (18)$$

Координата y_d точки D (пересечения двух прямых A_0C_0 и A_1C_1):

$$y_d = K_0x_d + y_0. \quad (19)$$

Уравнение прямой, проходящей через виртуальную точку D (при изменении толщины гребня x_g в пределах от x_{c0} до x_{c1} при $y_g = Y_c$), можно найти из соотношения:

$$\frac{y - y_d}{y_g - y_d} = -\frac{x - x_d}{x_g - x_d}. \quad (20)$$

В результате уравнение любой прямой, проходящей через точку D

$$y = K_gx + y_d - K_gx_d, \quad (21)$$

где K_g — коэффициент наклона пучка любых прямых, проходящих через виртуальную точку D , который зависит от значения x_g :

$$K_g = \frac{y_g - y_d}{x_g - x_d}. \quad (22)$$

Изменение угла наклона линии износа вертикального подреза гребня α_g от K_g составляет:

$$\alpha_g = \operatorname{tg}^{-1} K_g. \quad (23)$$

Функция изменения угла α_g (наклона линии, определяющей степень вертикального износа гребня) от толщины гребня, представлена на рис. 11, а.

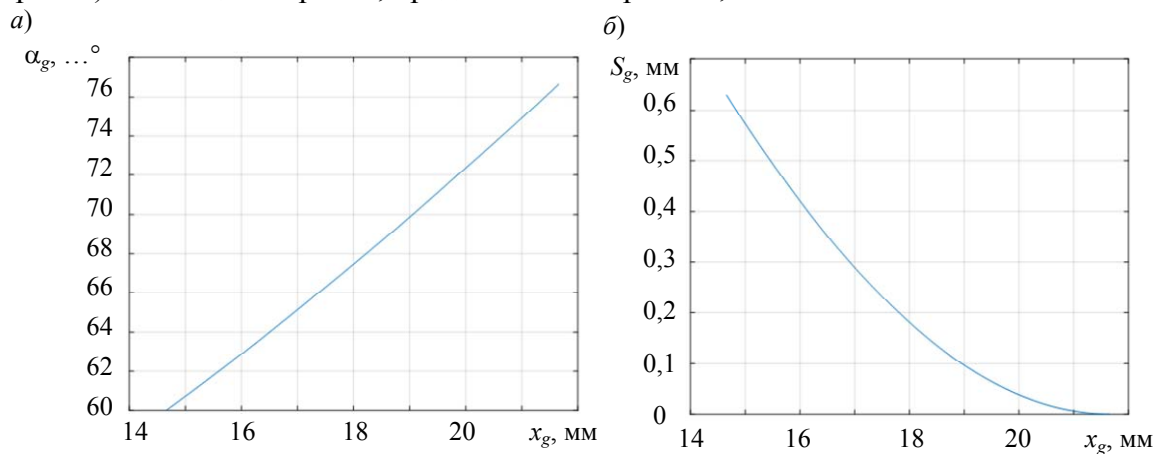


Рис. 11

Изменение угла наклона радиуса R_h (перпендикулярного линии A_0C_0) к оси X , в зависимости от α_g (см. рис. 9) описывается выражением:

$$\varphi_g = \frac{\pi}{2} - \operatorname{abs}(\alpha_g) - \gamma. \quad (24)$$

Зазор между краем шаблона и поверхностью вертикального подреза гребня, с учетом (16) и (24) в зависимости от α_g , составит:

$$S_g = R_h \frac{1 - \cos \varphi_g}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_g \right)}. \quad (25)$$

Полученная с помощью выражений модели (1)—(25) функция изменения зазора между краем шаблона и поверхностью вертикального подреза гребня S_g от изменения толщины гребня x_g в пределах от x_{c0} до x_{c1} , представлена на рис. 11, б в принятой системе координат.

Таким образом, функция изменения угла наклона линии износа вертикального подреза гребня от толщины гребня близка к линейной и в процессе эксплуатации колесной пары может достигать 75° . Скорость уменьшения зазора между краем шаблона и поверхностью вертикального подреза гребня снижается по мере износа гребня.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель процесса износа вертикального подреза гребня позволяет на основе трехточечной системы магнитоиндукционных датчиков и имитационной модели инструментального контроля параметров гребней колес автоматизировать процедуру диагностирования состояния профиля колесных пар в процессе движения состава по прямолинейному рельсовому пути.

2. Алгоритм, используемый в математической модели и реализованный на основе микропроцессорного контроллера, позволяет автоматически в режиме реального времени осуществлять приборный контроль состояния гребней колес и прогнозировать сроки технического обслуживания или ремонта колесных пар подвижного состава железнодорожного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байбаков А. Н., Кучинский К. И., Патерикин В. И., Плотников С. В., Сотников В. В. Опыт разработки и эксплуатации лазерных автоматизированных диагностических комплексов для бесконтактного контроля параметров колес грузовых вагонов // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 61—64.
2. Педали и датчики [Электронный ресурс]: <http://scbist.com/spravochnik/1/pedali_datchiki1.htm>. (дата обращения: 25.03.2022).
3. Петров К. С., Окишев А. С., Петров В. В. Математическая модель выходного сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе стигматического подхода // Известия Транссиба. 2020. № 2(42). С. 131—140.
4. Орлова А. М., Саидова А. В. Прогноз износа профилей колес с использованием динамических моделей // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 3(46). С. 51—53.
5. Пат. РФ 193429, МПК В61К 9/12. Устройство для определения положения колесных пар подвижного состава относительно прямолинейного рельсового пути / Е. В. Кондратенко, В. В. Петров, К. С. Петров. Заяв. № 2019118943, 17.06.2019. Оpubл. 29.10.2019.
6. Петров К. С., Петров В. В. Астигматическая модель сигнала магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе дискретного подхода // Известия Транссиба. 2021. № 2(46). С. 125—135.
7. Пат. РФ 192859, В61К 9/12. Устройство контроля технического состояния тележек подвижного состава / Е. В. Кондратенко, В. В. Петров, К. С. Петров. Заяв. № 2019118942, 17.06.2019. Оpubл. 03.10.2019.
8. Классификатор неисправностей вагонных колесных пар и их элементов [Электронный ресурс]: <<http://www.rcit.su/techinfo51.html>>. (дата обращения: 25.03.2022).
9. Петров К. С., Окишев А. С., Петров В. В. Применение трехточечной системы индукционных датчиков для оценки параметров профиля гребня колес подвижного состава на основе модели эквивалентной круговой формы // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: матер. науч. конф. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2022. С. 385—391.
10. Матяш Ю. И., Брылова Т. Б., Кирпиченко Е. М., Кондратенко Е. В. Визуальный метод неразрушающего контроля деталей железнодорожного подвижного состава: учеб.-метод. пос. для выполнения лабораторных работ. Ч. 1. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. 37 с.

Сведения об авторах	
Константин Сергеевич Петров	— студент; Омский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и систем управления
Евгений Владимирович Кондратенко	— канд. техн. наук; Омский государственный университет путей сообщения, кафедра вагонов и вагонного хозяйства
Владимир Владимирович Петров	— канд. техн. наук; Омский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и систем управления; старший научный сотрудник, E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Поступила в редакцию 20.04.22; одобрена после рецензирования 24.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Baibakov A.N., Kuchinskii K.I., Paterikin V.I., Plotnikov S.V., Sotnikov V.V. *Measurement Techniques*, 2010, no. 4, pp. 444–448.
2. http://scbist.com/spravochnik/1/pedali_datchiki1.htm. (in Russ.)
3. Petrov K.S., Okishev A.S., Petrov V.V. *Izvestiya Transsiba*, 2020, no. 2(42), pp. 131–140. (in Russ.)
4. Orlova A.M., Saidova A.V. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2013, no. 3(46), pp. 51–53. (in Russ.)
5. Patent RU 193429, B61K 9/12, *Ustroystvo dlya opredeleniya polozheniya kolesnykh par podvizhnogo sostava otnositel'no pryamolineynogo rel'sovogo puti* (Device for Determining the Position of Rolling Stock Wheelsets Relative to a Straight Track), Kondratenko E.V., Petrov V.V., Petrov K.S., Patent application no. 2019118943, Priority 17.06.2019, Published 29.10.2019. (in Russ.)
6. Petrov K.S., Petrov V.V. *Izvestiya Transsiba*, 2021, no. 2(46), pp. 125–135. (in Russ.)
7. Patent RU 192859, B61K 9/12, *Ustroystvo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya telezhek podvizhnogo sostava* (Device for Monitoring the Technical Condition of Rolling Stock Bogies), Kondratenko E.V., Petrov V.V., Petrov K.S., Patent application no. 2019118942, Priority 17.06.2019, Published 03.10.2019. (in Russ.)
8. <http://www.rcit.su/techinfo51.html>. (in Russ.)
9. Petrov K.S., Okishev A.S., Petrov V.V. *Innovatsionnyye proyekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte* (Innovative Projects and Technologies in Education, Industry and Transport), Materials of a Scientific Conference, Omsk, 2022, pp. 385–391. (in Russ.)
10. Matyash Yu.I., Brylova T.B., Kirpichenko E.M., Kondratenko E.V. *Vizual'nyy metod nerazrushayushchego kontrolya detaley zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* (Visual Method of Non-Destructive Testing of Parts of Railway Rolling Stock), Part 1, Omsk, 2018, 37 p. (in Russ.)

Data on authors

Konstantin S. Petrov	— Student; Omsk State Transport University, Department of Automation and Control Systems
Evgeny V. Kondratenko	— PhD; Omsk State Transport University, Department of Carriages and Carriage Facilities
Vladimir V. Petrov	— PhD; Omsk State Transport University, Department of Automation and Control Systems; Senior Scientist; E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Received 20.04.22; approved after reviewing 24.05.22; accepted for publication 21.06.22.

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГОНА
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Ю. О. СЕРЕБРЯКОВА, С. Н. ПОЛЕССКИЙ*, П. С. КОРОЛЕВ

*Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия***spolessky@hse.ru*

Аннотация. Показано, что не все математические модели, используемые для оценки времени проведения технологического прогона телекоммуникационного оборудования, учитывают конструктивно-технологические особенности последнего. Приведена статистика отказов телекоммуникационного оборудования, доказывающая необходимость учета этих особенностей. Показано, что одновременное воздействие таких факторов, как температура окружающей среды, цикличность включения/выключения, относительная влажность, напряжение питания или ток, приводит к ускорению технологического прогона в тысячи раз. Разработана методика, позволяющая значительно сократить время технологического прогона и подтверждения срока службы электронного модуля первого уровня телекоммуникационного оборудования. Преимуществами методики являются применение многофакторного форсированного режима для оценки необходимого коэффициента ускорения, а также учет факторов, значительно влияющих на состояние телекоммуникационного оборудования. Достоинство методики заключается в дифференциальном прогнозировании показателей надежности телекоммуникационного оборудования и в возможности сокращения количества отказов в период его нормальной эксплуатации, что доказано результатами экспериментального исследования.

Ключевые слова: безотказность, долговечность, технологический прогон, отказ, ускоренные испытания, методика, математическая модель

Ссылка для цитирования: Серебрякова Ю. О., Полесский С. Н., Королёв П. С. Методика оценки продолжительности технологического прогона телекоммуникационного оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 597—611. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-597-611.

**METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE DURATION
OF THE TECHNOLOGICAL RUN OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT**

Yu. O. Serebryakova, S. N. Polesskiy*, P. S. Korolev

*HSE University, Moscow, Russia***spolessky@hse.ru*

Abstract. It is shown that not all mathematical models used to estimate the time of the technological run of telecommunication equipment take into account the design and technological features of the hardware. The statistics of failures of telecommunication equipment are given, proving the need to take into account these features. It is shown that the simultaneous influence of factors such as ambient temperature, on/off cycling, relative humidity, supply voltage or current leads to an acceleration of the technological run by thousands of times. A technique has been developed that allows to significantly reduce the time of technological run-through and confirmation of the service life of the electronic module of the first level of telecommunication equipment. The advantages of the technique are the use of a multifactorial forced mode to assess the required acceleration coefficient, as well as taking into account factors that significantly affect the state of telecommunications equipment. The advantage of the technique lies in the differential prediction of reliability indicators of telecommunication equipment and in the possibility of reducing the number of failures during its normal operation, which is proved by the results of experimental research carried out.

Keywords: reliability, technological run, failure, accelerated testing, methodology, mathematical model

For citation: Serebryakova Yu. O., Polesskiy S. N., Korolev P. S. Methodology for estimating the duration of the technological run of telecommunication equipment. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 597—611 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-597-611.

Введение. Развитие отрасли телекоммуникационного оборудования (ТО) обуславливает усложнение конструкции разрабатываемых изделий, что может вызвать снижение надежности ТО [1]. Стоит отметить, что методы входного контроля и методы испытаний на предприятии значительно влияют на показатели надежности [1, 2], поскольку в большей степени отказы ТО обусловлены несовершенством методов контроля производства, недостатками в системе управления качеством проектирования, некачественными комплектующими элементами [3].

Чтобы минимизировать количество ранних отказов в период приработки изделий на предприятии, в качестве завершающего этапа технологического процесса применяется технологический прогон (ТП), который положительно влияет на показатели надежности (безотказность, сохраняемость, долговечность) выпускаемых партий ТО в целом [1, 2]. Это объясняется тем, что порядка 2 % изделий отказывают именно на этапе приработки [4].

Технологический прогон — это метод тестирования и анализа, заблаговременно определяющий возможные отказы изделия [2, 4]. Применительно к телекоммуникационному оборудованию в классическом виде он представляет собой ускоренное испытание при достижении предельных параметров окружающей среды. Однако результаты исследования, приведенные в [4], свидетельствуют, что ключевое влияние на ранние отказы оказывают скачки напряжения (тока).

В настоящее время не решен вопрос о длительности проведения технологического прогона ТО. При выявлении малого количества ненадежных образцов существует вероятность недостаточного по времени технологического прогона, а также при выявлении большого количества ненадежных образцов есть вероятность того, что он проводился излишне долго. На текущий момент над решением аналогичных проблем работают организации ВНИИР, ЦКБ „Дейтон“ и РНИИ „Электронстандарт“, которые регулярно выпускают справочники по характеристикам надежности электронной компонентной базы, в том числе по полупроводниковым приборам. Следовательно, цель настоящего исследования — повышение надежности ТО.

Постановка задачи. Цель настоящей статьи — разработка методики оценки длительности технологического прогона ТО, которая учитывает факторы, оказывающие влияние на время выполнения прогона. Методика должна задействовать действующую нормативно-техническую документацию (НТД).

В качестве примера ТО выбран сервер. Структура сервера: электрорадиоэлемент (конденсаторы, полупроводниковые приборы и др.) — модуль электронный нулевого уровня; функциональный узел (системный контроллер и др.) — модуль электронный первого уровня; радиоэлектронное устройство (материнская плата и др.) — модуль электронный второго уровня; составляющая сервера (система серверная) — модуль электронный третьего уровня и т.д. Для детального исследования выбран функциональный узел (модуль электронный первого уровня) ТО.

В ходе исследования должны быть выполнены: обзор актуальной статистики распределения отказов ТО; анализ периодов эксплуатации ТО; обзор и анализ типов и методов форсированных испытаний ТО, действующих подходов и математических моделей для оценки продолжительности проведения ТП; оценка времени технологического прогона для объекта исследования; разработка методики оценки продолжительности технологического прогона; экспериментальное исследование актуальности применения полученных результатов для выбранного объекта.

Распределение отказов. Согласно актуальной статистике [3], третье место (15 %) в распределении отказов занимают производственные отказы (рис. 1): нарушение работоспособности в результате инцидентов, возникающих во время производственного процесса (дефекты в местах пайки, например, трещины).



Рис. 1

Причины подобного рода отказов — применение низкокачественных материалов и комплектующих (недостаточный уровень показателя безотказности полупроводниковых приборов [5]), неисполнение обязательных требований НТД, недостаточный контроль производства [6], некорректная работа технологического оборудования и многое другое. Стоит привести в качестве примера данные производителя компании Cisco [7]: в коммутаторах зачастую выявляются поломки разъемов различных печатных узлов, отказы электронных модулей.

Не выявленные своевременно по результатам технологического прогона на предприятии отказы трансформируются в эксплуатационные (12 % от общего количества отказов). На текущий момент эффективность технологического прогона низкая, поскольку на производстве некорректно оценивают длительность его проведения.

Периоды эксплуатации. Различают три периода эксплуатации ТО: приработка; нормальная эксплуатация; интенсивный износ и старение [8]. Указанные периоды на кривой интенсивности отказов (λ) имеют явную закономерность (рис. 2; $t_{\text{ср.д}}$ — средняя долговечность, $t_{\text{ср}}$ — средняя наработка до первого отказа, $t_{\text{ср}} > t_{\text{ср.д}}$. Обычно $t_{\text{ср.д}}$ соответствует начальному участку периода старения и износа).

Приработка — эта начальная стадия работы ТО, которая обладает характерно высоким значением числа отказов. Согласно [1, 9], в этот период выявляются будущие неминуемые дефекты производства при сборке и монтаже ТО. Дело в том, что отказы, которые возникают при приработке, недопустимы для клиентов [10].

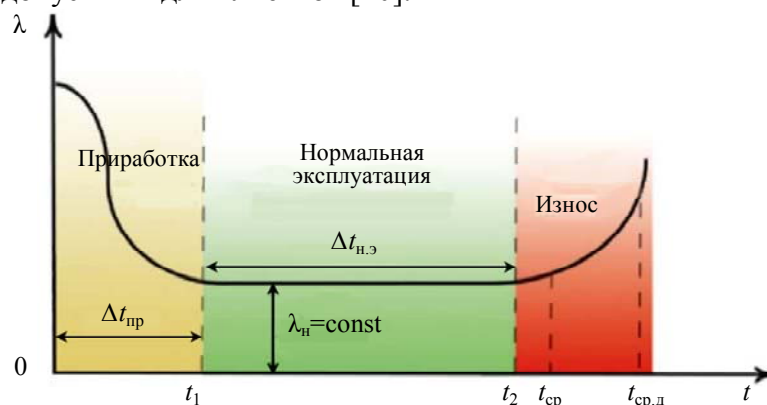


Рис. 2

Вследствие этого получается, что для идеального случая длительность приработки $\Delta t_{\text{пр}} \rightarrow 0$, а длительность нормальной работы ТО $\Delta t_{\text{н.э}} \rightarrow \infty$.

Ресурсные ускоренные испытания — это не только классические HALT (Highly Accelerated Life Testing) [10], но и термоиспытания при предельных температурах окружающей среды, энергоиспытания при предельных напряжениях питания и другие типы воздействия форсированного режима [1, 10]. Процесс HALT-испытаний приведен на рис. 3.

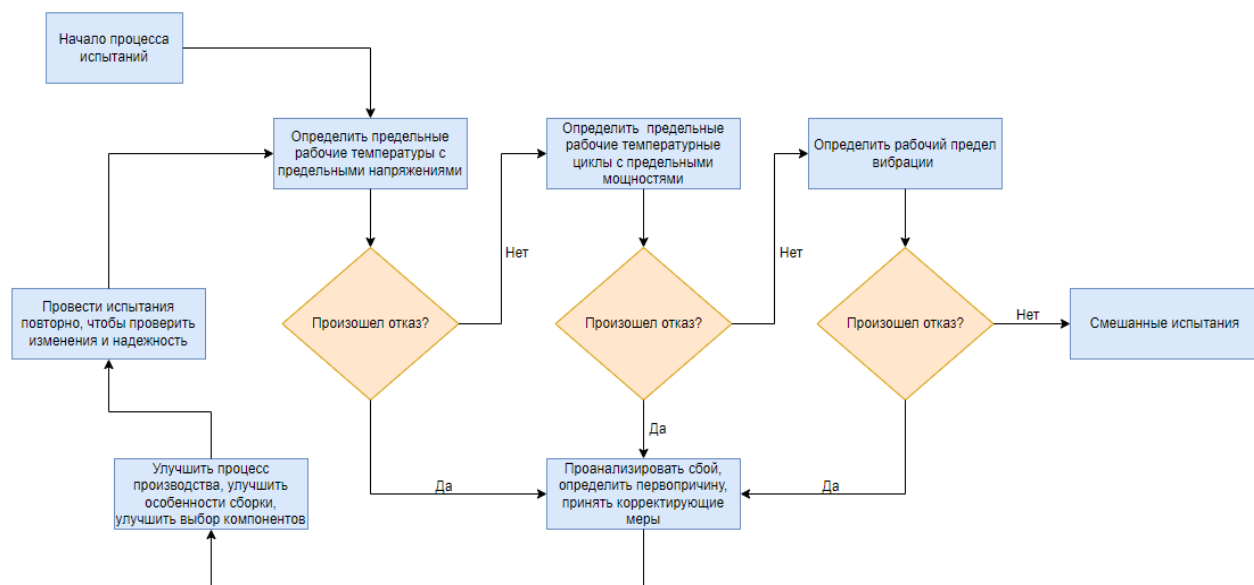


Рис. 3

Методология HALT заключается в том, чтобы ускорить отказ, выявить и смягчить недостатки ТО для повышения надежности во время эксплуатации в рабочих условиях. Этот тип ускоренного испытания предназначен не для измерения надежности оборудования, а для ее повышения за счет устранения режимов отказа с наименьшей разницей между нагрузкой самого изделия. Цель HALT состоит в том, чтобы идентифицировать эти несколько компонентов или деталей и сделать их такими же надежными, как и остальная часть изделия.

Методы ускорения испытаний. Быстрое обнаружение отказов изделий возможно с помощью различных методов, которые применяются в соответствии с тестируемым оборудованием или материалом [1, 10]:

- повышение истощения технического ресурса. Метод используется с изделиями, не находящимися в регулярной эксплуатации (увеличение нормы использования изделия по назначению приводит к снижению срока службы);

- ускорение старения — условия окружающей среды изменяются для увеличения скорости химической реакции разложения материалов за счет повышения, например, температуры;

- ускорение деградации. Метод требует увеличения электрической нагрузки. Это, как правило, приводит к раннему отказу изделия.

Подходы к оценке длительности ТП. Согласно работе [11], действующая НТД*, где регламентируются требования к оценке и обеспечению надежности, а также методам контроля, базируется, в частности, на международных стандартах с использованием классических подходов, синхронизирующихся с ними. Актуализация отмеченных стандартов проведена в 2021 г. В ГОСТ РВ 0020–39.411–2020 приведены принципы оценки показателей надежности изделий на этапах серийного производства; ГОСТ РВ 0020–39.413–2020 регламентирует кратковременные или длительные испытания на безотказность. Согласно ему, продолжительность квалификационных испытаний $t_{к.и}$ должна быть меньше продолжительности испытаний $t_{исп}$.

* ГОСТ РВ 0020–39.411–2020. Комплексные системы общих технических требований и контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Общие положения. [Дата введения 2021-03-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 17 с.; ГОСТ РВ 0020–39.413–2020. Комплексные системы общих технических требований и контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Требования к надежности. [Дата введения 2021-03-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 40 с.

Математические модели для оценки длительности ТП. Первая математическая модель длительности ТП t_{ϕ} приведена в работе [12]:

$$t_{\phi} = \frac{t_p}{K_n}, \quad (1)$$

где t_p — наработка изделий, полученная в реальных условиях (задается в виде промежутка); K_n — коэффициент подобия ускоренных испытаний.

Вторая модель продолжительности ТП $t_{\text{исп}}$ представлена в стандарте* и имеет следующий вид:

$$t_{\text{исп}} = \frac{|\ln \beta| \cdot T_{\beta}}{K_y}, \quad (2)$$

где β — оценка величины риска поставщика и заказчика; T_{β} — уровень брака согласно техническому заданию (ТЗ) T_0 : зачастую $T_{\beta} = T_0$; K_y — коэффициент форсированных испытаний по всем возможным ускоряющим факторам. Одновременное влияние факторов для K_y в математическом виде будет иметь следующий вид:

$$K_y = K_p K_T K_{\mu} N, \quad (3)$$

где K_p — коэффициент ускорения испытания изделий с любым известным видом резервирования; K_T — коэффициент ускорения испытаний, зависящий от температуры окружающей среды; K_{μ} — коэффициент ускорения испытаний, зависящий от циклического режима работы (к примеру, частота включения/отключения питания); N — число испытываемых изделий (одновременно), в частности, ТО. Необходимо отметить, что детальное описание подхода к определению процессов, приводящих к ускорению деградации при циклическом режиме K_{μ} , приводится в ГОСТ**.

Третье по важности выражение для оценки времени ТП указано в ГОСТ*** и представлено в виде:

$$t_{\text{исп}} = \frac{t_3}{K_y}, \quad (4)$$

где t_3 — диапазон времени воздействия на изделие агрессивной среды (в частности, условия среды указываются в документации на ТО); K_y — коэффициент ускорения.

Для T_3 также используют срок сохраняемости в эксплуатации для подверженных нагреву изделий; срок службы — для не нагреваемых изделий и ресурс — для тех покрытий материала изделий, которые защищены от воздействия таких сред.

* Курочкин В. Ф., Кубарев А. И., Бурдасов Е. И. и др. РД 50-424-83. Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения. [Дата введения 1985-01-01]. М.: Изд-во стандартов, 1985. 12 с. (Руководящий документ).

** ГОСТ РВ 0020-39.302-2019. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к программам обеспечения надежности и стойкости к воздействию специальных факторов. [Дата введения 2021-01-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 22 с.

*** ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий материалов и систем материалов. [Дата введения 2000-07-01]. М.: Издательство стандартов, 2001. 59 с.

Четвертая модель приведена в ГОСТ*:

$$t_{\text{пр}} = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{b_1 (S_{\text{ср}} - S_2 - S_4)}{S_1 + S_3 + b_0 (S_2 + S_4)} \right], \quad (5)$$

где $S_{\text{ср}}$ — финансовый показатель, учитывающий средние расходы организации (валюта — рубли) на ликвидацию последствий отказа образца в период гарантийного срока; S_1 — финансовый показатель для учета вознаграждения (валюта — рубли) персонала, принимающего участие в операциях ТП по обслуживанию экземпляра изделия за 1 ч; S_2 — средние затраты на заработную плату (валюта — рубли) сотрудников организации, проводящих ремонтные работы, отнесенные к отказу экземпляра изделия; S_3 — финансовый показатель, необходимый для учета средних расходов на энергию (валюта — рубли), отнесенный к одному изделию в течение 1 ч ТП; S_4 — финансовый показатель, служащий для учета средней стоимости комплектующих деталей и материалов (валюта — рубли), необходимых для восстановления отказавшего экземпляра изделия, или цены невозстанавливаемого экземпляра (в случае его отказа);

$$b_0 = \frac{\omega_1 \omega_n - \omega_{\text{ср}}^2}{\omega_1 + \omega_n - 2\omega_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

где ω_1 — ордината экспериментальной функции, абсцисса которой, t_1 , подбирается равной одному из первых значений t_j ; ω_n — ордината экспериментальной функции, для которой абсциссу t_n определяют так, чтобы была равна одному из конечных вариантов значений t_j ; $\omega_{\text{ср}}$ — ордината экспериментальной функции, для которой абсциссу $t_{\text{ср}}$ оценивают по выражению:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_n}{2}. \quad (7)$$

Коэффициент b_1 должен быть определен с помощью математической модели:

$$\ln b_1 = \frac{\sum_{j=1}^k x_j^2 \cdot \sum_{j=1}^k y_j - \sum_{j=1}^k x_j y_j \cdot \sum_{j=1}^k x_j}{k \sum_{j=1}^k x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^k x_j \right)^2}. \quad (8)$$

Оценка коэффициента α происходит по математической модели:

$$\alpha = \frac{\left| k \sum_{j=1}^k x_j y_j - \sum_{j=1}^k x_j \cdot \sum_{j=1}^k y_j \right|}{\left| k \sum_{j=1}^k x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^k x_j \right)^2 \right|}, \quad (9)$$

* ГОСТ 23502-79. Обеспечение надежности на этапе производства. Технологический прогон изделий бытового назначения. М.: Изд-во стандартов, 1979.

где k — общее количество скачков экспериментальной функции; x_j — временной диапазон от начала координат до середины интервала (t_{j-1}, t_j) ; численные значения y_j оцениваются с помощью следующего выражения:

$$y_j = \ln(\omega_j - b_0), \quad (10)$$

Пятая математическая модель, представленная в НТД*, позволяет оценить коэффициент ускорения при HALT-испытаниях A_f , а именно:

$$A_f = \left(\frac{RH_t}{RH_u} \right)^3 \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right], \quad (3)$$

где RH_t — коэффициент, принимающий численное значение влажности, достигнутое при использовании образцов ТО; RH_u — коэффициент, принимающий численное значение влажности, достигнутое при испытаниях образцов ТО; k_B — постоянная Больцмана; E_a — энергия активации; T_t — коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды при использовании образцов ТО (единицы измерения — градусы Цельсия); T_u — коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды при испытаниях образцов ТО (единицы измерения — градусы Цельсия).

Коэффициент ускорения по циклам включения/выключения (циклический режим работы) образцов ТО K_{BB} определяется по математической модели, приведенной в ГОСТ Р 57394-2017:

$$K_{BB} = Z\gamma, \quad (12)$$

где Z — суммарное число циклов за 1 ч непрерывной работы образцов; γ — отношение параметра потока отказов в циклическом режиме к параметру потока отказов в непрерывном режиме.

В итоге кумулятивный коэффициент ускорения K_y должен определяться как сумма составных частей ТО с учетом различных механизмов отказа:

$$K_y = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{I_i} q_{ij}^0 K_{ij}, \quad (13)$$

где K_{ij} — коэффициент ускорения по i -му фактору; весовой коэффициент q_{ij} для каждого компонента ТО оценивается в следующем виде:

$$q_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_i \sum_j \lambda_{ij}}, \quad (14)$$

где λ_{ij} — интенсивность отказов i -го механизма отказов j -й группы компонентов ТО, см. ГОСТ Р 57394-2017.

Проведенный анализ показал, что модели (1), (2), (4) и (11) учитывают конструктивно-технологические особенности ТО, а формула (5) — нет. Отсюда следует, что она не подходит для оценивания длительности технологического прогона ТО.

Оценка длительности ТП. Объектом исследования для оценки длительности ТП выступает управляемый эквивалент электрической нагрузки (УЭЭН), являющийся составной частью ТО, электрическая принципиальная схема (СЭП) которого представлена на рис 4. УЭЭН может эксплуатироваться в широком диапазоне рабочих температур окружающей среды: от -40 до $+80$ °C.

* ГОСТ Р 57394-2017 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые // Методы ускоренных испытаний на безотказность. [Дата введения 2018-01-01]. М.: Стандартинформ, 2017. 42 с.

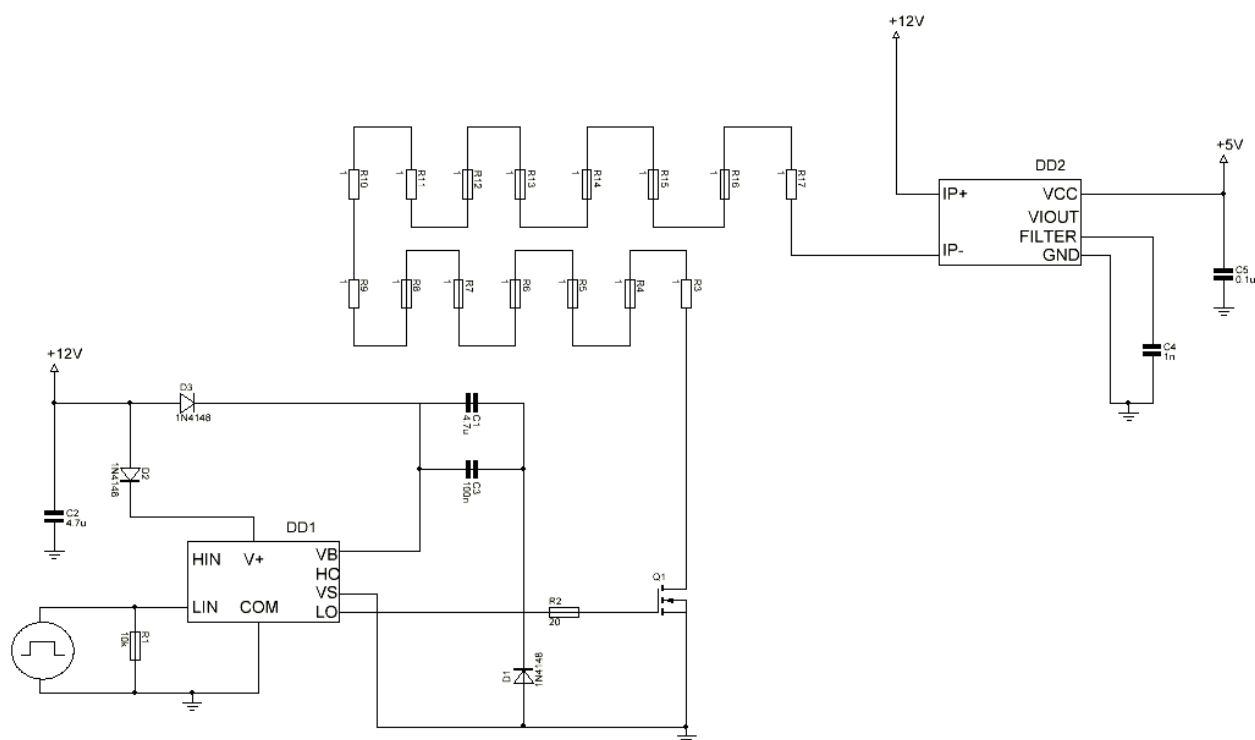


Рис. 4

Срок службы СЭП УЭЭН — 43 800 ч. Состав компонентов УЭЭН представлен в табл. 1.

Таблица 1

Комплектующие УЭЭН

Компонент	Количество	Рабочие температуры, °C
Конденсатор	5	– 40 ... + 125
Резистор	17	– 55 ... + 155
Диод	3	– 50 ... + 80
Транзистор	1	– 55 ... + 175

Для УЭЭН в качестве примера по методике, описанной в НТД (ГОСТ Р 57394-2017), выполнена оценка длительности эксперимента при максимальной нижней температуре окружающей среды, равной – 40 °C. Табл. 2 сформирована благодаря информации о параметрах и характеристиках комплектующих рассматриваемого изделия и данным, указанным в справочнике [13].

Таблица 2

Параметры температуры и относительной влажности элементов УЭЭН

Наименование элемента	E_A	$\kappa, 10^{-5}$	T_T	T_U	RH_T	RH_U	Эксплуатационная интенсивность отказов, $10^{-6}, 1/\text{ч}$	A_F
Конденсатор	0,35	8,6	+45	–40	0,1	0,95	0,0095	8,115235148
Резистор	0,16	8,6	+25	–40	0,1	0,95	0,1503	101,8528616
Диод	0,7	8,6	+25	–40	0,1	0,95	0,0701	0,076812412
Транзистор	0,7	8,6	+45	–40	0,1	0,95	0,0701	0,076812412

Число циклов включения/выключения питания УЭЭН $\gamma=1,5$, частота — $Z=10$. Результирующее значение коэффициента ускорения $K_{BB} = 15$. Итоговый коэффициент ускорения K_y УЭЭН — 1390, а средневзвешенный поправочный коэффициент эксплуатации $K_3 = 5,64$.

Длительность ТП с учетом предыдущих рассчитанных данных должна оцениваться по выражению (4). Время испытаний: без отказов — 86 ч, 1 отказ — 186 ч, 2 отказа — 288 ч, 3 отказа — 390 ч. Важно отметить, что константы в моделях коэффициентов ускорения для i -го фактора оценивались при установленных неизменных значениях других.

Проведены похожие расчеты продолжительности испытаний (рис. 5), но с последовательным учетом рассмотренных ранее влияющих факторов.

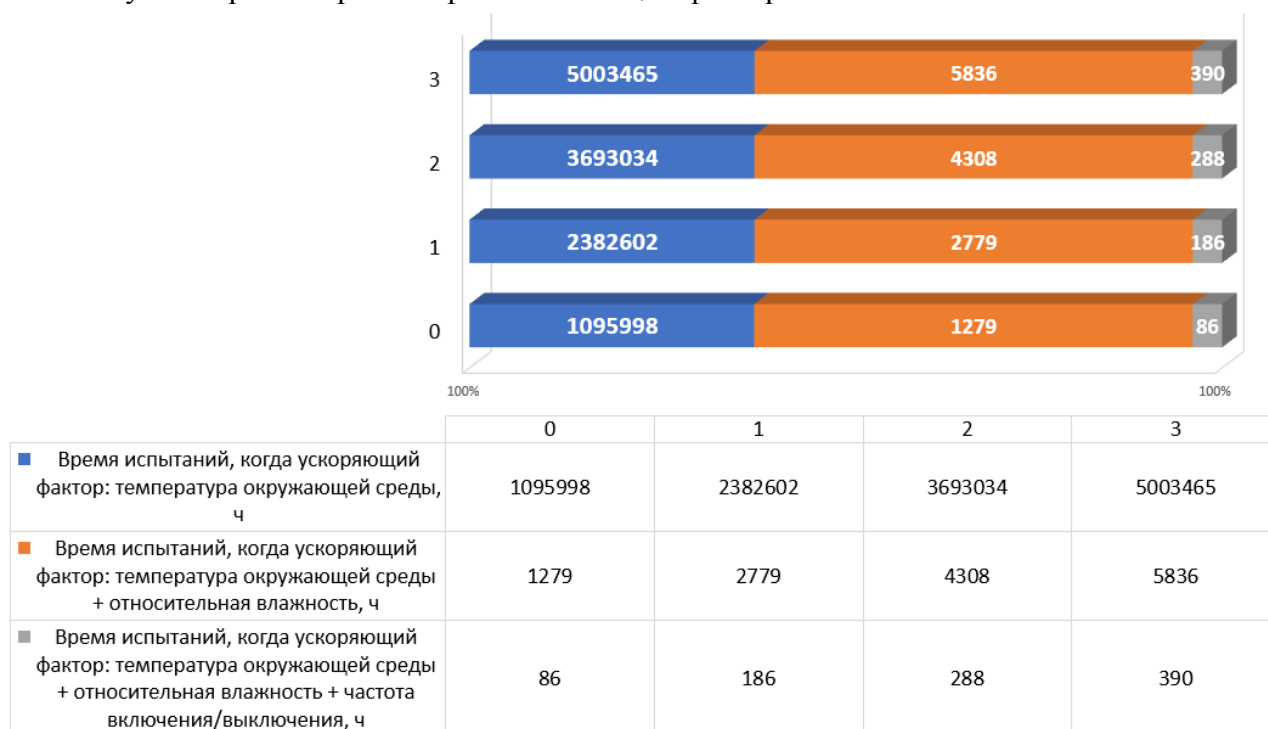


Рис. 5

Рис. 5 наглядно отображает тот факт, что значительное влияние на длительность ТП оказывают: повышенная цикличность режима работы, относительная влажность и температура окружающей среды. Если применить указанные факторы в виде воздействия на изделие одновременно, тогда длительность ТП сократится в тысячи раз и более.

Расчеты показали, что для идентификации хотя бы единственного отказа составной части ТО при коэффициенте ускорения $K_y = 1390$ необходимо проводить испытания в течение 186 ч. Однако основной задачей настоящего исследования является определение оптимальной длительности ТП изделия $t_{исп}$. В связи с этим необходимо определить оптимальный коэффициент ускорения, позволяющий сократить время испытаний, например, до трех суток (72 ч).

Согласно действующей НТД (ГОСТ Р 57394-2017), наработку ТО t_p можно оценивать с помощью следующей математической модели:

$$t_p = K_y t_{исп}. \quad (15)$$

Определение срока службы t_{cc} возможно также по выражению, приведенному в ГОСТ Р 57394-2017:

$$t_{cc} = \frac{t_p}{K_{из} \cdot 8760}, \quad (16)$$

где $K_{из}$ — коэффициент интенсивности эксплуатации.

Воспользовавшись указанными выше формулами, получим ресурс выбранного объекта ТО УЭЭН, равный 259 000 ч. Однако примем, что для выявления одного отказа экземпляра изделия будет требоваться не 186 ч, а в 2,6 раз меньше, т.е. 72 ч. В таком случае $K_y = 3576$. Поэтому время, отведенное на проведение испытаний, значительно изменится (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета времени проведения технологического прогона УЭЭН $K_y = 3576$

Число отказов	Без отказов	1 отказ	2 отказа	3 отказа
Время испытаний, ч	33	72	112	151
Наработка, ч	118479	258480	402080	542090
Срок службы, ч	43789	43633	43478	43691

Графический вид результирующей оценки длительности проведения ТП для выбранного объекта исследования УЭЭН коэффициенте ускорения 3576 приведен на рис. 6.

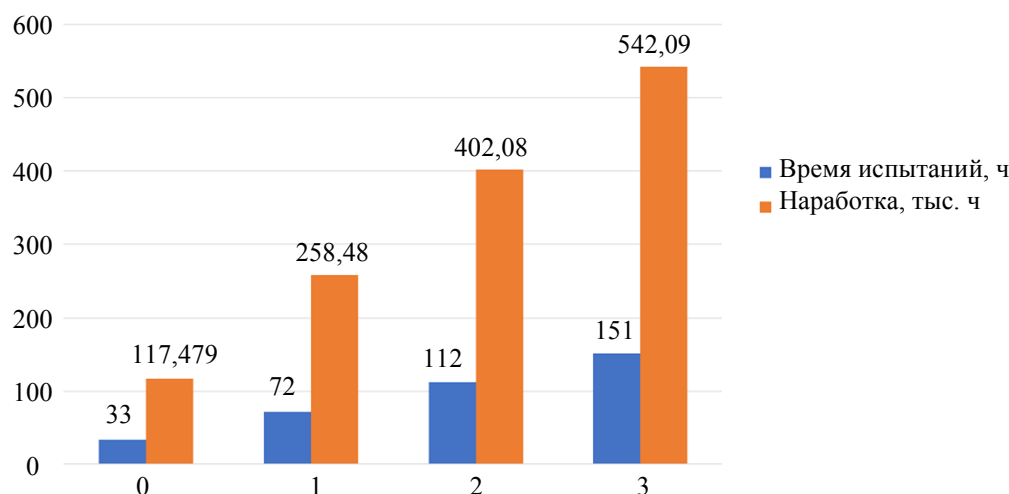


Рис. 6

Информация, приведенная на рис. 7 (представлены не округленные рассчитанные численные значения), демонстрирует, что необходимое время для проведения ТП стало меньше в 2,6 раз.

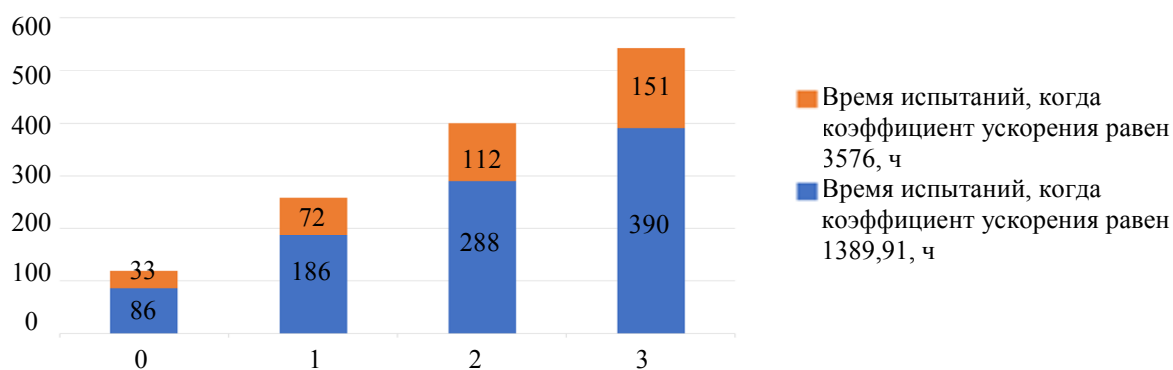


Рис. 7

В этой связи для УЭЭН как составной части ТО: 1) подтвержден срок службы, а именно 43 800 ч; 2) значительно сократилось время, необходимое для технологического прогона.

Методика оценки продолжительности технологического прогона. Проведенное исследование математических моделей, использующихся для оценки длительности ТП, позволяет заключить, что не во всех них используются коэффициенты, учитывающие влияние на показатели надежности телекоммуникационного оборудования. Следовательно, в настоящей работе рекомендуется для применения новая разработанная методика для проведения ТП (рис. 8). Она позволяет учитывать все ранее перечисленные важные ускоряющие факторы, оказывающие существенное влияние на вероятность проявления отказов и суммарной длительности работы составных частей ТО.

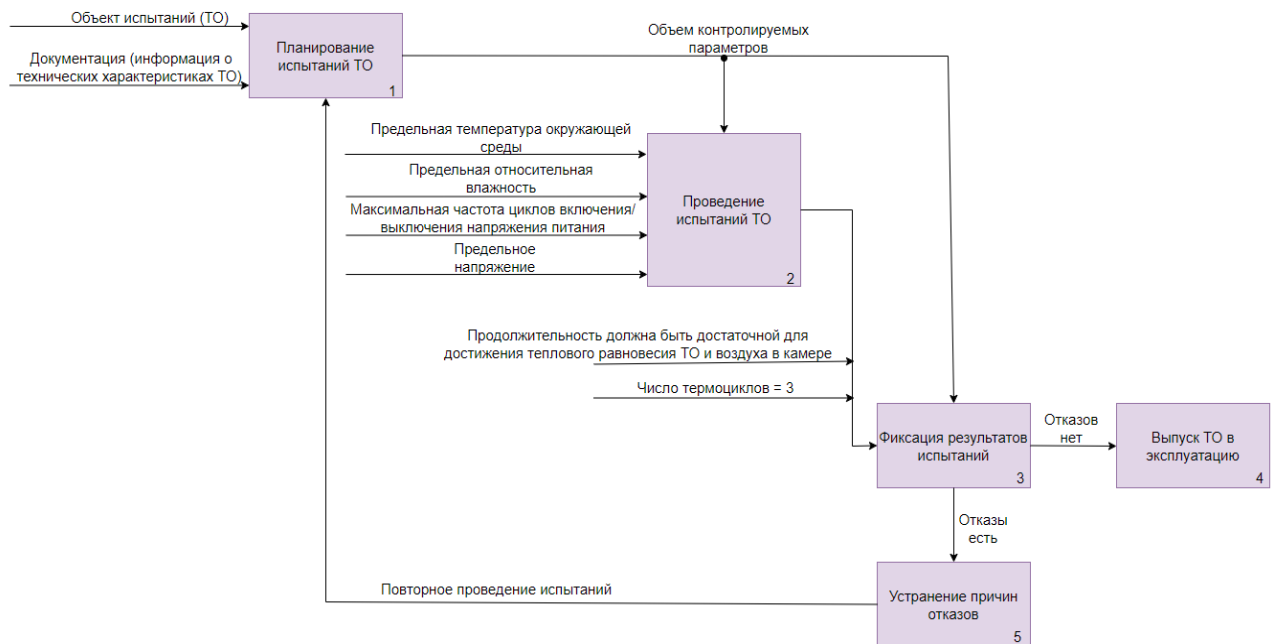


Рис. 8

Согласно действующей НТД, условия проведения испытаний, реализуемые для температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$ в диапазоне от $+15$ до $+35$ °C и для относительной влажности в диапазоне от 45 до 75 % относятся к нормальным климатическим условиям (НКУ). Для условий эксплуатации изделий ТО характерны следующие параметры: относительная влажность; повышенная и пониженная предельные температуры окружающей среды T_{max} и T_{min} ; рабочая температура окружающей среды $T_{\text{раб}}$; а средняя наработка до отказа и средний срок службы изделий устанавливаются согласно их техническим характеристикам.

Ускорение испытаний изделий ТО необходимо выполнять с помощью увеличения и уменьшения температуры окружающей среды относительно установленной рабочей $T_{\text{раб}}$; а также с помощью увеличения частоты циклов включения/выключения напряжения питания. Ускоренные испытания следует осуществлять последовательно за несколько этапов (рис. 9; U_{min} — пониженное напряжение питания, U_{max} — повышенное напряжение питания, *** — повышенная влажность, ^ — повышенная частота циклов включения/выключения питания).

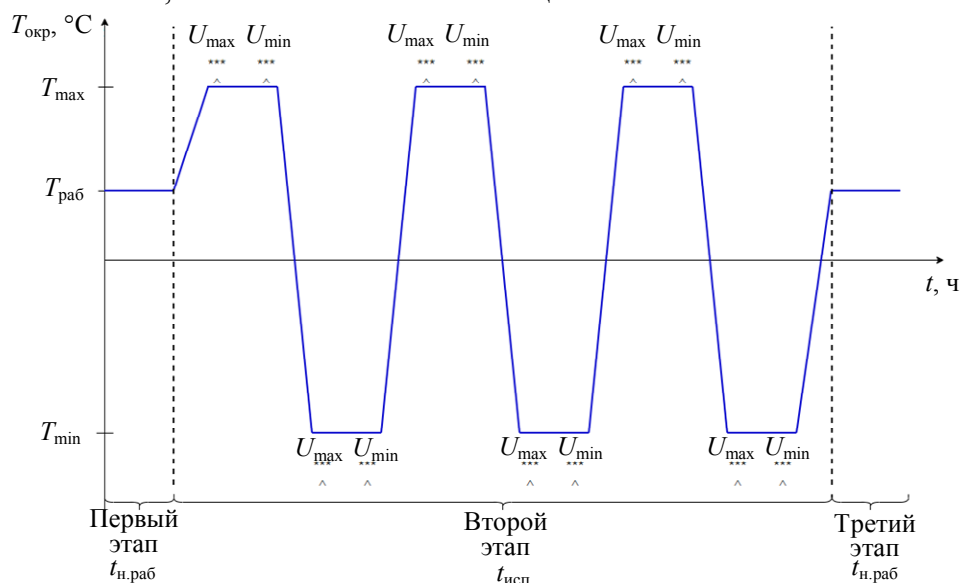


Рис. 9

Этап первый. Контроль параметров изделий ТО при установленных НКУ — для этого необходимо включить климатическую камеру и расположить внутри нее испытываемое

изделие. После прохождения испытаний изделие считается успешным, если его параметры и характеристики соответствует заявленным в паспорте или технических условиях.

Этап второй. Воздействие на изделие ТО термоциклирования и повышенной влажности. На данном этапе проводятся испытания при достижении предельных значений температуры окружающей среды и относительной влажности в режиме повышенной частоты переключения (изменения) напряжения питания. Согласно исследованию [14], рекомендуется применение трех термоциклов, которые должны соответствовать оптимальной длительности и эффективности. Для этого нужно включить климатическую камеру и расположить внутри нее испытываемое изделие. Важно соблюдать условия испытаний, а именно: установить согласно НКУ температуру внутри климатической камеры и проконтролировать ее; термоциклы необходимо проводить в пределах минимальной и максимальной рабочих температур изделия ТО; задать повышенную относительную влажность. После прохождения изделия испытаний необходима проверка. Испытания успешны, если параметры и характеристики изделия ТО соответствует заявленным в паспорте или технических условиях, а также данным, полученным на первом этапе.

Этап третий. Дополнительный контроль параметров и характеристик изделий ТО при НКУ. Этап необходим для сравнения полученных значений с параметрами первого этапа. Для этого необходимо включить климатическую камеру и расположить внутри нее испытываемое изделие. Испытания успешны, параметры и характеристики изделия соответствует заявленным в паспорте или технических условиях, а также данным, получившимся на первом этапе.

Следует отметить, что коэффициент ускорения при форсированных испытаниях (повышенная и пониженная температура испытаний, повышенная относительная влажность, увеличенная частота циклов напряжения питания) определяется согласно математической модели (15) для получения наименьшего времени проведения испытаний (длительность испытаний для первого и третьего этапов определяется согласно ГОСТ*).

Таким образом, становится возможным детальней оценить показатели надежности изделий ТО, в частности, срок службы и среднюю наработку до отказа на втором этапе. Благодаря применению методики при проведении технологического прогона снижается число отказов изделий ТО.

Экспериментальное исследование. Для проведения эксперимента выполнена сборка выбранного ранее объекта УЭЭН (рис. 10).

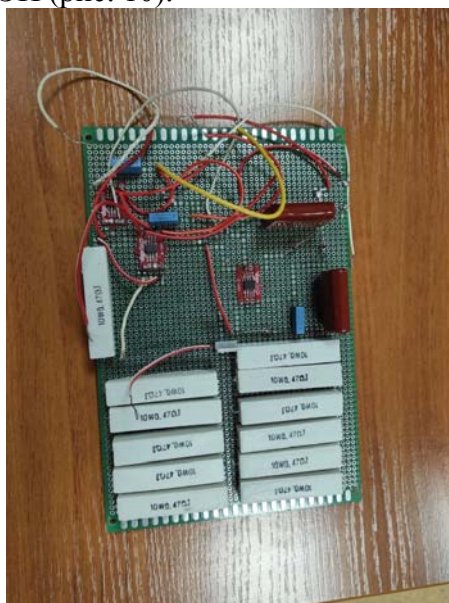


Рис. 10

* ГОСТ РВ 0020–57.306–2019. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие климатических факторов. [Дата введения 2021-01-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 46 с.

Далее для УЭЭН адаптирована циклограмма испытаний, согласно представленной на рис. 9. На рис. 11 приведена упрощенная циклограмма для проведения экспериментального технологического прогона над УЭЭН: $T_{\max} = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{раб}} = +45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{н.раб}} = 2\text{ ч}$ [13], $t_{\text{исп}} = 72\text{ ч}$.

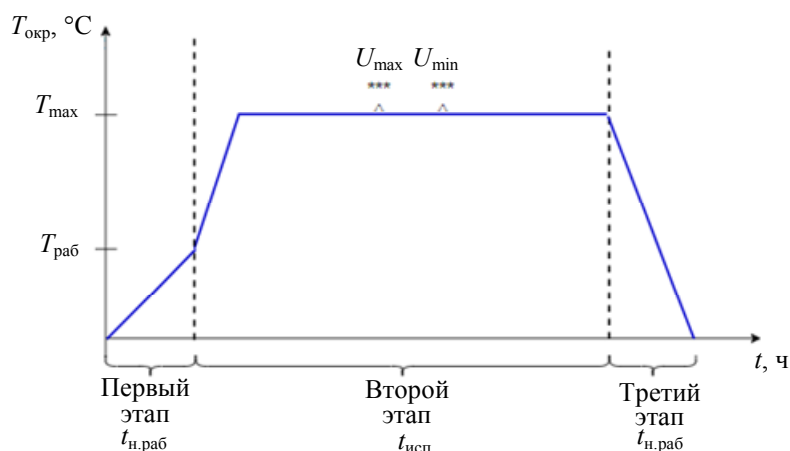


Рис. 11

Стенд для проведения эксперимента подготовлен согласно структурной схеме, приведенной на рис. 12 (КТХ — климатическая камера, БП — блок электропитания, ЦППД — цифровой прибор приема и передачи данных, АРМ — автоматизированное рабочее место).

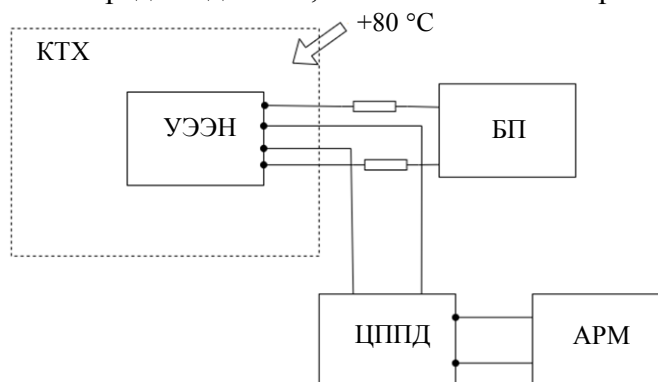


Рис. 12

На первом этапе испытаний объект УЭЭН был включен, и в течение 2 ч работал непрерывно, в это время снимались показания напряжения с изделия: в конце этапа, когда устройство достигло своей рабочей температуры $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$, напряжение питания составляло $+5\text{ В}$. На втором этапе испытаний была включена климатическая камера, в результате чего объект УЭЭН был нагрет до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ с коэффициентом ускорения, равным 3576. Когда температура достигла максимума, процесс нагрева был остановлен, и начался процесс включения/выключения устройства. На 68 ч произошел отказ драйвера полевого транзистора DD1, который позволяет управлять напряжением на затворе транзистора. Отказ драйвера полевого транзистора DD1 привел к отказу функционального узла УЭЭН. Более подробно экспериментальное исследование представлено в [15].

Таким образом, подтверждено, что предложенная в настоящей работе методика может использоваться для оценки продолжительности технологического прогона ТО.

Заключение. Работа показала важность правильного выбора длительности технологического прогона изделий телекоммуникационного оборудования. Теоретическое и экспериментальное исследование доказало, что значительное влияние на продолжительность ТП оказывает совокупность следующих факторов: увеличенная частота циклов включения/выключения изделия, повышенная относительная влажность и повышенная (или пониженная) температура окружающей среды (эксплуатации). В частности, показано, что одновременное влияние указанных факторов

при проведении ТП телекоммуникационного оборудования позволяет ускорить ТП в тысячи и более раз (в зависимости от предельных режимов работы и условий применения) по сравнению с последовательным применением единичного фактора.

Определен приемлемый уровень коэффициента ускорения для оценки оптимальной длительности технологического прогона — это позволило снизить время ТП с семи до трех дней, при этом без существенного увеличения периода износа и старения. В то же время подтверждено, что срок службы не подвергся изменению.

Предложена методика технологического прогона функционального узла ТО. Согласно ей, испытания должны проводиться в три этапа: испытания при НКУ, ускоренные испытания с одновременным ускорением по четырем факторам (температура окружающей среды, относительная влажность, частота циклов включения/выключения, напряжение питания) и повторные испытания в НКУ. Преимущество методики заключается в том, что она, благодаря использованию многофакторного форсированного режима, позволяет существенно сократить продолжительность испытаний, а также получить прогноз по показателям безотказности, долговечности и уменьшить число отказов при эксплуатации. Проведено экспериментальное исследование, по результатам которого можно сделать вывод, что методика применима для электронных модулей 1-го уровня (функционального узла ТО), входящих в состав ТО, так как рассчитанное время и коэффициент ускорения достаточны для определения времени наступления отказа. Подтверждено, что приборы полупроводниковые наиболее уязвимы к отказам за счет внешних воздействующих факторов на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдусевский В. С., Северцев Н. А., Кузнецов В. И. и др. Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 тт. М.: Машиностроение, 1986—1990.
2. Артёмов И. И., Симонов А. С., Денисова Н. Е. Прогнозирование надежности и длительности приработки технологического оборудования по функции параметра потока отказов // Надежность и качество: тр. междунар. симп. Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. Т. 2. С. 3—7.
3. Denson W. Handbook of 217plus reliability prediction models. RIAC. 2006.
4. Горлов М., Адамян А., Ануфриев Л. и др. Тренировка изделий электронной техники и электронных блоков // ChipNews. 2001. № 10.
5. РМ 11 0004-84. Контроль неразрушающий. Методы диагностики состояния полупроводниковых приборов по производным вольт-амперных характеристик. М.: ВНИИ „Электростандарт“, 1984. 43 с.
6. Королев П. С. Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 316—328.
7. Trouble shooting Hardware and Common Issues on Catalyst 6500/6000 Series Switches Running Cisco IOS System Software [Электронный ресурс]: <<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-6500-series-switches/24053-193.html#subtopic2a>>. (дата обращения: 18.04.2022).
8. Wilkins D. J. The Bathtub Curve and Product Failure Behavior Part One-The Bathtub Curve // Infant Mortality and Burn-in [Электронный ресурс]: <<https://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>>.
9. Строгонов А., Белых М., Пермяков Д. Анализ методов расчета эксплуатационной интенсивности отказов БИС // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 1.
10. Zaharia S., Martinescu I., Morariu C. Life time prediction using accelerated test data of the specimens from mechanical element // Eksplotacja i Niezawodnosc. 2012. N 14. P. 99—106.
11. Гербин А. Использование ускоренных методов оценки показателей надежности изделий ЭКБ отечественного производства — один из путей повышения их коммерческой привлекательности // Электроника: наука, технология, бизнес. 2019. № 9. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.136.140.
12. Матвеевский В. Р. Надежность технических систем. М., 2003. 113 с.
13. Надежность ЭРИ ИП 2006: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 52 с.

14. Бухаров А. Е., Жихарев И. А., Иофин А. А. Некоторые методические особенности технологической тренировки радиовысотомеров // Тр. Междунар. симп. „Надежность и качество“. 2008. Т. 2. С. 116—119.
15. Создание методики технологического прогона телекоммуникационного оборудования [Электронный ресурс]: <<https://www.hse.ru/edu/vkr/628353363?ysclid=I59m0dkisyg753088704>>. (дата обращения: 20.06.2022).

Сведения об авторах

- Юлия Олеговна Серебрякова** — студентка; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии / Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова;
E-mail: yuoserebryakova@edu.hse.ru
- Сергей Николаевич Полесский** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии / Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова; доцент; E-mail: spolessky@hse.ru
- Павел Сергеевич Королев** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии / Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова; старший преподаватель; E-mail: pskorolev@hse.ru

Поступила в редакцию 27.04.22; одобрена после рецензирования 26.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Avduyevskiy B.C., Severtsev N.A., Kuznetsov V.I. et al. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: spravochnik* (Reliability and Efficiency in Engineering: a Handbook), Moscow, 1986–1990. (in Russ.)
2. Artyomov I.I., Simonov A.S., Denisova N.E. *Nadezhnost' i kachestvo* (Reliability and Quality), Proceedings of the International sympos., Penza, 2010, vol. 2, pp. 3–7. (in Russ.)
3. Denson W. *Handbook of 217plus reliability prediction models*, RIAC, 2006.
4. Gorlov M., Adamyan A., Anufriev L. et al. *ChipNews*, 2001, no. 10.
5. RM 11 0004-84. *Kontrol' nerazrushayushchiy. Metody diagnostiki sostoyaniya poluprovodnikovyykh priborov po proizvodnym volt-ampernyykh kharakteristik* (RM 11 0004-84. The control is Non-Destructive. Methods for Diagnosing the State of Semiconductor Devices by Derivatives of Current-Voltage Characteristics), Moscow, 1984, 43 p. (in Russ.)
6. Korolev P.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 4(64), pp. 316–328. (in Russ.)
7. *Troubleshooting Hardware and Common Issues on Catalyst 6500/6000 Series Switches Running Cisco IOS System Software*, <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-6500-series-switches/24053-193.html#subtopic2a>.
8. Wilkins D.J. *Infant Mortality and Burn-in*, <https://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>.
9. Strogonov A., Belykh M., Permyakov D. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2022, no. 1. (in Russ.)
10. Zaharia S., Martinescu I., Morariu C. *Eksplotatsja i Niezawodnosc*, 2012, no. 14, pp. 99–106.
11. Herbin A. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2019, no. 9, DOI: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.136.140. (in Russ.)
12. Matveevsky V.R. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* (Reliability of Technical Systems), 2003, Moscow, 113 p. (in Russ.)
13. *Nadezhnost' ERI IP 2006* (Reliability ERI IP 2006), Reference book, Moscow, 2006, 52 p. (in Russ.)
14. Bukharov A.E., Zhikharev I.A., Iofin A.A. *Nadezhnost' i kachestvo* (Reliability and Quality), Proceedings of the International sympos., Penza, 2008, vol. 2, pp. 116–119. (in Russ.)
15. <https://www.hse.ru/edu/vkr/628353363?ysclid=I59m0dkisyg753088704>. (in Russ.)

Data on author

- Yulia O. Serebryakova** — Student; HSE University, Department of Computer Engineering / Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics;
E-mail: yuoserebryakova@edu.hse.ru
- Sergey N. Polesskiy** — PhD; HSE University, Department of Computer Engineering / Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; Associate Professor;
E-mail: spolessky@hse.ru
- Pavel S. Korolev** — PhD; HSE University, Department of Electronic Engineering / Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; Senior Lecturer;
E-mail: pskorolev@hse.ru

Received 27.04.22; approved after reviewing 26.05.22; accepted for publication 21.06.22.

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЕЙШИХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ РАСТЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА ПРОЧНОСТИ НА РАЗРЫВ

Л. И. ШАЛАМАЙ¹, Е. Ю. МЕНДОСА², Е. Е. МАЙОРОВ^{3*},
В. Б. ЛАМПУСОВА¹, Н. С. ОКСАС¹

¹ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова,
Санкт-Петербург, Россия

² Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова,
Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
*majorov_ee@mail.ru

Аннотация. Новейшие стоматологические материалы исследованы методом растяжения для получения параметра прочности на разрыв. Сохранность реставрационных композитных материалов на твердых тканях зуба обеспечивается механическими параметрами, поэтому работа перспективна и актуальна для терапевтической стоматологии. Для разных композитов с помощью автоматизированной разрывной машины ИМ-4Р получены параметры прочности на разрыв. Параметры прочности измерены на тридцати образцах, площадь поперечного сечения каждого образца равнялась 5 мм. Результаты измерений зависимости прочности от номера стоматологического композита представлены полиномами третьей степени; определены значения достоверности аппроксимации.

Ключевые слова: метод растяжения, прочность на разрыв, терапевтическая стоматология, композитный материал, разрывная машина, аппроксимация, полином

Ссылка для цитирования: 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 // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 612—618. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-612-618.

STUDY OF THE LATEST DENTAL MATERIALS BY STRETCHING TO OBTAIN THE TENSILE STRENGTH PARAMETER

L. I. Shalamay¹, E. Yu. Mendosa², E. E. Maiorov^{3*}, V. B. Lampusova¹, N. S. Oksas¹

¹ Pavlov University, St. Petersburg, Russia

² A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry,
Moscow, Russia

³ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
*majorov_ee@mail.ru

Abstract. The latest dental materials are tested by stretching to obtain a tensile strength parameter. The safety of restorative composite materials on the hard tissues of the tooth is ensured by mechanical parameters, so the work is promising and relevant for therapeutic dentistry. For different composites, the tensile strength parameters were obtained using the IM-4R automated tensile testing machine. The strength parameters were measured on thirty specimens where the cross-sectional area of each specimen was 5 mm. The results of measurements of the dependence of strength on the number of dental composites are represented by polynomials of the third degree; the values of approximation reliability are determined.

Keywords: tensile method, tensile strength, therapeutic dentistry, composite material, breaking machine, approximation, polynomial

For citation: Shalamay L. I., Mendosa E. Yu., Maiorov E. E., Lampusova V. B., Oksas N. S. Study of the latest dental

Введение. В настоящее время огромное внимание в стоматологии терапевтической уделяют механическим свойствам композитных материалов [1, 2]. На сегодняшний день современные композиты активно исследуются оптическими, химическими и механическими методами и средствами [3, 4]. Состав, оптические и механические свойства используемого композита учитываются для конструкций разной сложности [5, 6]. Успешное восстановление различных сложных профилей (дефектов) и придание естественных оттенков твердым тканям зуба является ключевой задачей терапевтической стоматологии [7, 8].

Сохранность на твердых тканях зуба реставрационных композитных материалов обеспечивается такими механическими параметрами, как прочность на сжатие и на изгиб, твердость к истиранию [9, 10].

Растяжение и сжатие — современные разрушающие методы исследования механических свойств твердых веществ разной природы. В настоящей работе использовался метод растяжения, позволивший получить такой немаловажный параметр, как прочность на разрыв [9, 10]. Анализ научной литературы показал, что прочность на разрыв композитных материалов практически не исследована.

Ведущие фирмы-производители стоматологических реставрационных материалов постоянно совершенствуют механические и оптические (блеск) свойства, ведут работы по повышению биологической совместимости с твердыми тканями зуба [11—14].

Целью исследования явилось испытание новейших стоматологических материалов методом растяжения для получения параметра прочности на разрыв.

Автоматизированная разрывная машина. Измерения механического напряжения (прочности) проводились на автоматизированной разрывной машине ИМ-4Р [15]. Внешний вид ИМ-4Р представлен на рис. 1, а.

а)



б)

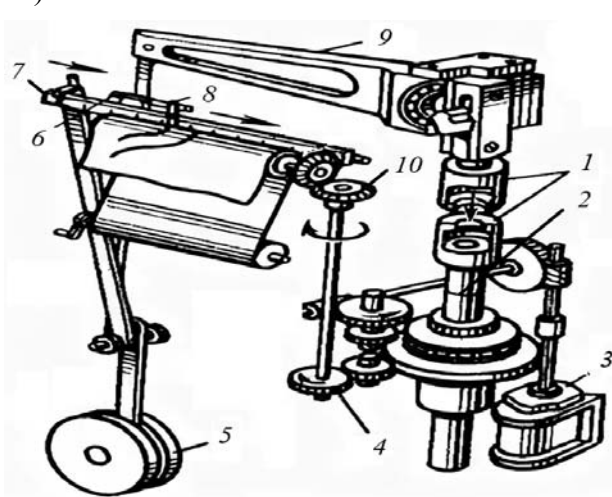


Рис. 1

Функциональная схема разрывной машины ИМ-4Р представлена на рис. 1, б. Машина состоит из нижнего и верхнего зажимов 1, в которые устанавливается образец. Нижний зажим соединен с винтом 2 нагружающего механизма. Верхний зажим соединен с силоизмерительным механизмом, состоящим из рычага 9 и маятника 5. При вращении электродвигателя 3 винт 2 начинает перемещаться вниз, в связи с чем усилие растяжения передается на зажимы, образец и измерительную систему. Стрелка 7 перемещается по шкале 6, указывая действительную нагрузку, а перо 8 автоматически записывает на бумаге диаграмму (кривую)

в координатах нагрузка—деформация. Вращение барабана осуществляется при помощи зубчатых колес 4 и 10. В нашем случае сигнал с компьютера приводит в движение электродвигатель, и все величины с машины фиксируются в специально разработанной программе.

Исследуемые объекты. В работе исследовались пять образцов новейших стоматологических композитов:

1) Omnichroma Blocker — это универсальный дополнительный опакующий композит пастообразной консистенции, который предназначен для восстановления небной стенки при обширных дефектах III и IV классов и выраженном дефиците тканей зуба;

2) Omnichroma — при реставрации зубов этот инновационный пастообразный композит применяют как „универсальную эмаль“. В полостях глубиной до 2—2,5 мм Omnichroma используется как самостоятельный пломбировочный материал;

3) Estelite Asteria — светоотверждаемый, рентгенконтрастный композиционный материал пастообразной консистенции, предназначенный для восстановления передних и боковых зубов в биламинарной технике;

4) Estelite Universal Flow Medium — низко модульный композит средней вязкости. Сферическая форма частиц уникального синтезированного моноразмерного (200 нм) циркониевого наполнителя в комбинации со сферическим предварительно полимеризованным композитным наполнителем, также включающим частицы кремний-циркона размером 200 нм, обеспечивают высокую прочность, низкие показатели полимеризационной усадки (линейная усадка 2,3 %), истираемости, сверхлегкую полируемость и устойчивый блеск отреставрированной поверхности;

5) Estelite Bulk Fill Flow — композит низкой вязкости для объемного внесения в полость (толщина слоя может достигать 4 мм). Высокая концентрация сферических кремний-циркониевых частиц (200 нм) гарантирует прочность композита, устойчивость к истиранию и низкий процент усадки (линейная усадка 2,1 %).

Образцы Estelite Bulk Fill Flow, Estelite Universal Flow Medium, Estelite Asteria, Omnichroma, Omnichroma Blocker были предоставлены компанией ООО „Центр имплантации и комплексного лечения“ (Санкт-Петербург).

Экспериментальные результаты. Для получения параметра прочности на разрыв стоматологические образцы разных композитов крепились в захваты разрывной камеры. На рис. 2 представлен образец Omnichroma Blocker в разрывной камере машины ИМ-4Р: показано, как поворотом винта выставлялись зазоры в захватах. Образец центрировался до испытания.



Рис. 2

Для испытания методом растяжения применялись специально изготовленные стоматологические образцы с разной площадью поперечного сечения (от 1 до 5 мм). Испытания образцов проводились на разрывной машине ИМ-4Р с предельной нагрузкой $P = 4 \cdot 10^4$ Н.

Действующие силы, прикладываемые к образцу, создавались винтом 2 (см. рис. 1, б), приводимым в поступательное движение через систему зубчатых передач и кинематическую пару гайка—винт. Зубчатые передачи приводились в движение электродвигателем 3. Усилие винта 2 через захваты 1, образец и тягу передавались на короткое плечо рычага 9, создавая на нем активный момент. Реактивный момент, уравнивающий активный, создавался на длинном плече рычага 9 усилием, возникающим при отклонении от вертикального положения маятника 5. Маятник представлял собой коленчатый рычаг, шарнирно связанный с тягой и рычагом. Таким образом, внутренние силы действовали на материал и фиксировались цифровым блоком согласования. Полученные данные обрабатывались и представлялись в виде таблицы на компьютере.

На рис. 3 представлен образец Omnicroma Blocker после испытания. Параметры прочности на разрыв измерены на тридцати образцах, площадь поперечного сечения (S) каждого образца равнялась 5 мм. Информация по параметру прочности на разрыв сведена в таблицу.



Рис. 3

**Экспериментальные результаты определения прочности на разрыв
стоматологического композита**

Материал	n , шт	σ , МПа
Estelite Universal Flow Medium оттенка А2	1	145,21
	2	145,12
	3	144,95
	4	144,99
	5	145,01
	6	145,11
Omnicroma Blocker	1	143,05
	2	142,98
	3	143,05
	4	143,11
	5	142,97
	6	142,88
Estelite Bulk Fill Flow оттенка А2	1	139,12
	2	138,81
	3	139,05
	4	138,98
	5	139,10
	6	139,01
Omnicroma	1	135,05
	2	134,97
	3	134,89
	4	134,91
	5	135,11
	6	135,1

Продолжение таблицы

Материал	n , шт	σ , МПа
Estelite Asteria оттенка A2B	1	129,42
	2	129,50
	3	129,39
	4	129,31
	5	129,19
	6	129,30

Результаты измерений зависимости прочности (σ) от номера (n) стоматологического композита представлены полиномами третьей степени и определены значения достоверности аппроксимации (R^2):

- $\sigma(n) = 0,0136n^3 - 0,142n^2 + 0,3844n + 129,17$; $R^2 = 0,9755$ — для Estelite Asteria,
- $\sigma(n) = -0,0075n^3 + 0,105n^2 - 0,4018n + 135,37$; $R^2 = 0,7941$ — для Omnicroma;
- $\sigma(n) = -0,0213n^3 + 0,2347n^2 - 0,7454n + 139,63$; $R^2 = 0,5561$ — для Estelite Bulk Fill Flow;
- $\sigma(n) = -0,0094n^3 + 0,0824n^2 - 0,2053n + 143,17$; $R^2 = 0,7963$ — для Omnicroma Blocker;
- $\sigma(n) = 0,001n^3 + 0,0198n^2 - 0,204n + 145,4$; $R^2 = 0,9133$ — для Estelite Universal Flow Medium.

Из приведенных результатов видно, что прочность образцов различается. Зависимости прочности на разрыв от номера испытуемого образца приведены на рис. 4: *a* — Estelite Universal Flow Medium, *б* — Omnicroma Blocker, *в* — Estelite Bulk Fill Flow, *г* — Omnicroma, *д* — Estelite Asteria. Проанализировав полученные зависимости, можно с уверенностью сказать, что из всех исследуемых материалов более прочным оказался Estelite Universal Flow Medium.

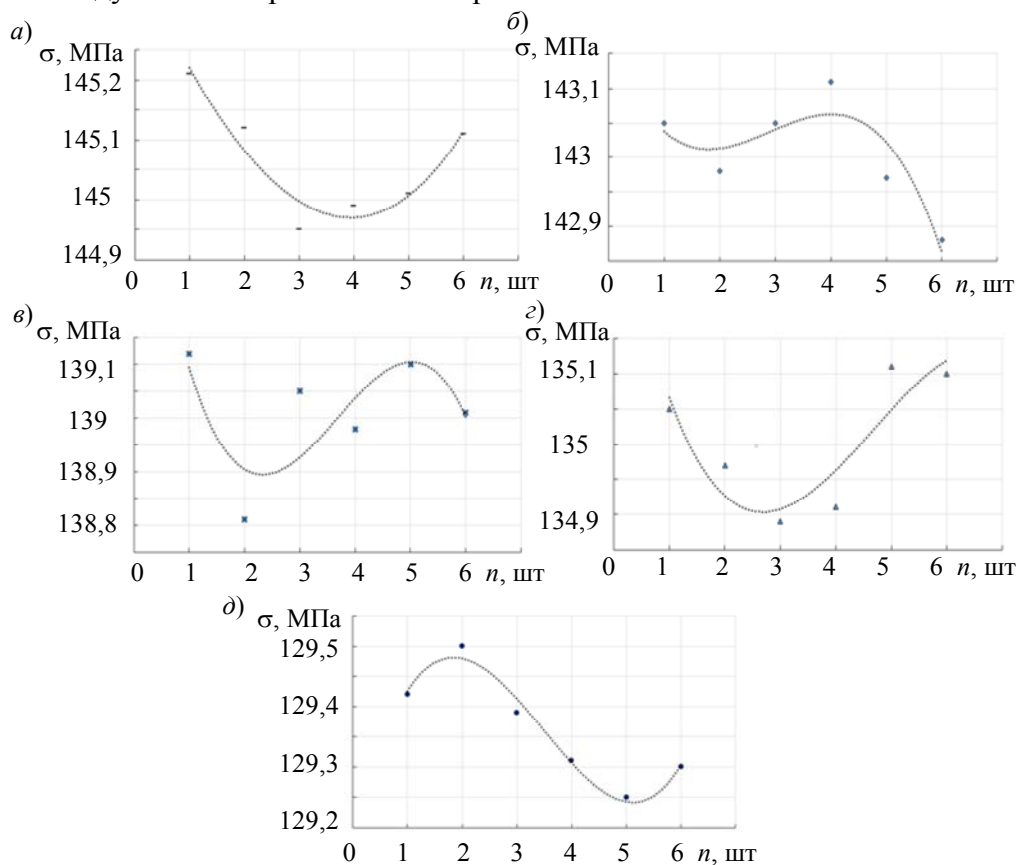


Рис. 4

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования стоматологических реставрационных материалов методом растяжения имеют важное практическое значение как для производителей этих материалов, так и специалистов в сфере терапевтической стоматологии. Предложенная методика позволяет получить параметр физико-механических свойств мате-

риалов — прочность на разрыв. Полученные результаты расширяют спектр исследований данных объектов для изучения кристаллической решетки на молекулярном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луцкая И. К. Практическая стоматология. Минск: Бел. наука, 1999. 360 с.
2. Новак Н. В., Байтус Н. А. Анализ физико-механических характеристик твердых тканей зуба и пломбировочных материалов // Вестн. ВГМУ. 2016. Т. 15, № 1. С. 19—26.
3. Виноградова Т. В., Уголева С. А., Казанцев Н. Л., Сидоров А. В., Шевченко М. В. Клинические аспекты применения композитов для реставрации зубов // Новое в стоматологии. 1995. № 6. С. 326.
4. Григорьев С. С., Кудинов П. Н., Бисярина Л. И. Оценка влияния отбеливающей внутрикоронковой системы на физико-химические свойства дентина // Медико-фармацевтический журнал „Пульс“. 2017. Т. 19, № 10. С. 76—80.
5. Токмакова С. И., Луницына Ю. В. Сравнительная оценка краевой проницаемости пломбировочных материалов, используемых при ретроградном пломбировании корневых каналов зубов // Проблемы стоматологии. 2014. № 5. С. 30—32.
6. Цимбалистов А. В., Копытов А. А., Чуев В. П., Асадов Р. И., Винаков Д. В. Анализ механических характеристик облицовочных композиционных материалов Ceramage (Shofu) и UltraGlass (владмива) // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Медицина. 2018. Т. 22, № 4. С. 415—420. DOI: 10.22363/2313-0245-2018-22-4-415-420.
7. Гайдарова Т. А., Еремина Н. А., Иншаков Д. В. Способ прижизненного измерения твердости тканей зуба // Acta Biomedica Scientifica. 2007. № 6(58). С. 92—95.
8. Луцкая И. К., Марченко Е. И., Чухрай И. Г. Эстетическое пломбирование некариозных дефектов твердых тканей зуба // Современная стоматология. 2012. № 1. С. 29—31.
9. Majorov E. E., Prokopenko V. T. A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects // Biomedical Engineering. 2012. Vol. 46, N 3. P. 109—111.
10. Новак Н. В., Байтус Н. А. Изолирующие свойства устьевой пломбы при внутрикоронковом отбеливании зубов // Вестн. ВГМУ. 2017. Т. 16, № 2. С. 113—119.
11. Majorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical Engineering. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304—306.
12. Кузьменков М. И., Сушкевич А. В., Манак Т. Н. Синтез клинкера для стоматологического цемента для пломбирования корневых каналов // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. 2011. № 3. С. 79—83.
13. Майоров Е. Е., Попова Н. Э., Шаламай Л. И., Цыганкова Г. А., Черняк Т. А., Пушкина В. П., Писарева Е. А., Дагаев А. В. Цифровая голографическая интерферометрия как высокоточный инструмент в стоматологии // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 249—256.
14. Адамович Е. И., Македонова Ю. А., Павлова-Адамович А. Г. Качественная реставрация — залог успешного лечения // Медико-фармацевтический журнал „Пульс“. 2017. Т. 19, № 7. С. 51—53.
15. Кудрявцев И. В., Чулошников М. И. Испытательная машина типа ИМ-4Р: Описание и руководство по эксплуатации. М.: Изд-во и 1-я тип. Машгиза, 1949. 36 с.

Сведения об авторах

Людмила Ивановна Шаламай

— канд. мед. наук, доцент, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии; E-mail: l.shalamay@mail.ru

Елена Юрьевна Мендоса

— Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова, кафедра клинической стоматологии, ассистент, E-mail: mendosaMSUMD@gmail.com

Евгений Евгеньевич Майоров

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

- Виктория Борисовна Лампусова** — канд. мед. наук, доцент, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии; victoriala383@gmail.com
- Наталья Сергеевна Оксас** — канд. мед. наук, ассистент, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, кафедра стоматологии терапевтической и пародонтологии; ассистент, E-mail: gyvas@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.22; одобрена после рецензирования 04.06.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Lutsкая I.K. *Prakticheskaya stomatologiya* (Practical Dentistry), Minsk, 1999, 360 p. (in Russ.)
2. Novak N.V., Baytus N.A. *Vestnik of Vitebsk State Medical University*, 2016, no. 1(15), pp. 19–26. (in Russ.)
3. Vinogradova T.V., Ugoleva S.A., Kazantsev N.L., Sidorov A.B., Shevchenko M.V. *Novoye v stomatologii*, 1995, no. 6, pp. 326. (in Russ.)
4. Grigoriev S.S., Kudinov P.N., Bisyarina L.I. *Medico-pharmaceutical journal "Pulse"*, 2017, no. 10(19), pp. 76–80. (in Russ.)
5. Tokmakova S.I., Lunitsyna Yu.V. *Actual problems in dentistry*, 2014, no. 5, pp. 30–32. (in Russ.)
6. Tscymbalystov A.V., Kopytov A.A., Chuev V.P., Asadov R.I., Vinakov D.V. *RUDN Journal of Medicine*, 2018, no. 4(22), pp. 415–420, DOI: 10.22363/2313-0245-2018-22-4-415-420. (in Russ.)
7. Gaidarova T.A., Eremina N.A., Inshakov D.V. *Acta Biomedica Scientifica*, 2007, no. 6(58), pp. 92–95. (in Russ.)
8. Lutsкая I.K., Marchenko E.I., Chukhray I.G. *Sovremennaya stomatologiya*, 2012, no. 1, pp. 29–31. (in Russ.)
9. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Biomedical Engineering*, 2012, no. 3(46), pp. 109–111.
10. Novak N.V., Baytus N.A. *Vestnik of Vitebsk State Medical University*, 2017, no. 2(16), pp. 113–119. (in Russ.)
11. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Biomedical Engineering*, 2014, no. 6(47), pp. 304–306. (in Russ.)
12. Kuzmenkov M.I., Sushkevich A.V., Manak T.N. *Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 2011, no. 3, pp. 79–83. (in Russ.)
13. Maiorov E.E., Popova N.E., Shalamay L.I., Tsygankova G.A., Chernyak T.A., Pushkina V.P., Pisareva E.A., Dagaev A.V. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2018, no. 10, pp. 249–256. (in Russ.)
14. Adamovich E.I., Makedonova Yu.A., Pavlova-Adamovich A.G. *Medico-pharmaceutical journal "Pulse"*, 2017, no. 7(19), pp. 51–53. (in Russ.)
15. Kudryavtsev I.V., Chuloshnikov M.I. *Ispytatel'naya mashina tipa IM-4R* (Testing Machine Type IM-4R), Moscow, 1949, 36 p. (in Russ.)

Data on authors

- Ludmila I. Shalamay** — PhD, Associate Professor, Pavlov University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; E-mail: l.shalamay@mail.ru
- Elena Yu. Mendosa** — A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Department of Clinical Dentistry, Assistant; E-mail: mendosaMSUMD@gmail.com
- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Victoria B. Lampusova** — PhD, Associate Professor, Pavlov University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; E-mail: victoriala383@gmail.com
- Nataliya S. Oksas** — PhD, Assistant, Pavlov University, Department of Therapeutic Dentistry and Periodontology; Assistant; E-mail: gyvas@yandex.ru

Received 16.05.22; approved after reviewing 04.06.22; accepted for publication 21.06.22.