

ISSN 2500—0381

Электронная версия

ISSN 0021—3454

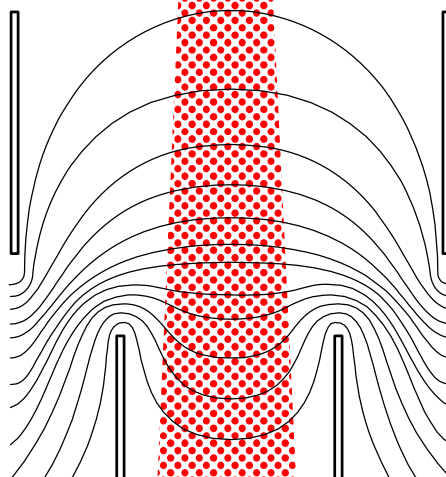
Печатная версия

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



№ **1**
Т. 66
2023

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



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

проф. А. А. БОБЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Ответственный секретарь *М. В. Лебецкая*

Редактор *И. М. Игошина*

Набор, верстка: *М. В. Герасимова*

Перевод: *Ю. И. Копилевич*

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

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

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

Подписано в печать 27.01.2023 г.

Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Рукопись должна содержать:

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

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

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

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

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

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

Датой поступления статьи считается последняя после доработки.

Плата за публикацию не взимается.

Специальный выпуск,
посвященный памяти Е. И. Яблочникова

СОДЕРЖАНИЕ

Помпеев К. П., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И., Волосатова Е. Е. Автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка в условиях цифрового производства	7
Чукичев А. В., Тимофеева О. С., Андреев Ю. С. Интеллектуальные подходы к автоматизации технологической подготовки производства полимерных изделий методом литья под давлением.....	16
Mäkiö E., Mäkiö J., Kipriianov K. V., Arckhipov V. A. A Retrospective Study of the Benefits of the “CPS Engineering” Courses for Current Graduate Careers	25
Абышев О. А., Дыйканбаева У. М., Омуралиев У. К. Методика построения индустриальных агентов с применением технологических адаптеров.....	34
Абышев О. А., Яблочников Е. И., Заколдаев Д. А. Сервис-ориентированная архитектурная модель дискретной производственной системы	43
Басова Т. В., Андреев Ю. С., Басова М. В. Методика операционного контроля ротационного режущего инструмента на станках с числовым программным управлением.....	56
Юдин С. А., Исаев Р. М. Технологические особенности обработки поверхностей деталей пьезоэлектрического датчика вибрации	66
Колганов О. А., Ильинский А. В., Егоров Р. А., Хошев А. Е., Федоров А. В. Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании	74

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 Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Maria V. Gerasimova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

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

Tel: (812) 480-02-73

Site: pribor.ifmo.ru

E-mail: pribor@itmo.ru

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 66

JANUARY 2023

№ 1

Special Issue
dedicated to the memory of E. I. Yablochnikov

CONTENTS

Pompeev K. P., Timofeeva O. S., Yablochnikov E. I., Volosatova E. E. Automated Design and Technological Preparation in the Conditions of Digital Production.....	7
Chukichev A. V., Timofeeva O. S., Andreev Yu. S. Intelligent Approaches to Automation of Technological Preparation for Polymer Products Manufacturing by Injection Molding	16
Mäkiö E., Mäkiö J., Kipriianov K. V., Arckhipov V. A. A Retrospective Study of the Benefits of the “CPS Engineering” Courses for Current Graduate Careers	25
Abyshev O. A., Dyikanbaeva U. M., Omuraliev U. K. Method for Constructing Industrial Agents Using Technological Adapters	34
Abyshev O. A., Yablochnikov E. I., Zakoldaev D. A. Service-Oriented Architectural Model of Discrete Production System.....	43
Basova T. V., Andreev Yu. S., Basova M. V. Method of Operational Control of a Rotary Cutting Tool on Machine Tools with Numerical Control	56
Yudin S. A., Isaev R. M. Technological Features of Surface Treatment of a Piezoelectric Vibration Sensor Parts	66
Kolganov O. A., Ilyinsky A. V., Egorov R. A., Khoshev A. E., Fedorov A. V. Differential Connection of Inductance Coils for Recording the Parameters of Striker Motion During Dynamic Indentation	74

To the Authors!

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

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

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

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

Submission includes two copies of:

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

— extended abstract (150—250 words);

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

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

— the recommendation of the Department (laboratory);

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

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

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

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

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

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

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

Editorial Staff

Уважаемые читатели!

Настоящий выпуск журнала подготовлен в память Евгения Ивановича Яблочникова, известного российского ученого, доцента факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, безвременно ушедшего из жизни в 2021 году.

Евгений Иванович был основателем теоретических подходов к созданию интегрированных информационных систем, базирующихся на новых архитектурах автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) с использованием технологий информационной поддержки изделий. Им были созданы научно-методические положения и рекомендации к предметной области с применением комплексов PDM/CAD/CAE/CAM-систем; предложены научно-методические принципы построения архитектуры АСТПП, включая: системность, эволюцию, информативность, совместимость, декомпозицию, а также виртуальное моделирование и прототипирование; впервые были сформулированы уникальные принципы новых бизнес-процессов проектирования АСТПП с использованием виртуального моделирования.

С 2006 года Е. И. Яблочников возглавлял кафедру технологии приборостроения Университета ИТМО. Под его руководством ведущими учеными и преподавателями кафедры была начата активная работа в рамках научно-образовательного направления „Интегрированные компьютерные технологии проектирования и производства приборов и систем“. Е. И. Яблочников стал идейным вдохновителем научного развития и внедрения концепции управления жизненным циклом продукта.

Научное направление, созданное Евгением Ивановичем, продолжает развиваться при участии его коллег, преподавателей, аспирантов и студентов.

Настоящий выпуск журнала, в подготовке которого приняли участие друзья и коллеги Евгения Ивановича, содержит статьи, отражающие результаты научно-исследовательских работ в области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства и технологических процессов изготовления изделий приборостроения. Предложены новые методики организации работы конструкторских и технологических подразделений предприятий, основанные на современных инструментах индустриальных киберфизических систем. Рассмотрены вопросы повышения эффективности проведения контрольных операций в условиях цифрового производства, а также подходы к обучению инженеров будущего.

*Кандидат технических наук, доцент
факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО
Ю. С. АНДРЕЕВ*

To the Readers!

This issue of the journal was prepared in memory of Evgeny Ivanovich Yablochnikov, a well-known Russian scientist, associate professor at the Faculty of Control Systems and Robotics at ITMO University, who untimely passed away in 2021.

Evgeny Ivanovich was the founder of theoretical approaches to the creation of integrated information systems based on new architectures of automated systems for technological preparation of production (ASTPP) using technologies for information support of products. He created scientific and methodological provisions and recommendations for the subject area using PDM/CAD/CAE/CAM systems; proposed scientific and methodological principles for building the architecture of the ASTPP, including consistency, evolution, informativeness, compatibility, decomposition, as well as virtual modeling and prototyping; for the first time, unique principles of new business processes for designing ASTPP were formulated using virtual modeling.

Since 2006, E. I. Yablochnikov had headed the Department of Instrumentation Technology at ITMO University. Under his supervision, the leading scientists and teachers of the department began active work within the framework of the scientific and educational direction “Integrated computer technologies for the design and production of devices and systems”. E. I. Yablochnikov became the ideological inspirer of scientific development and implementation of the concept of product life cycle management.

The scientific direction created by Evgeny Ivanovich continues to develop with the participation of his colleagues, lecturers, post-graduate students and students.

This issue of the journal, prepared with the participation of friends and colleagues of Evgeny Ivanovich, contains articles reflecting results of research work in the field of automation of design and technological preparation of production and technological processes for manufacturing instrumentation products. New methods for organizing the work of design and technological departments of enterprises based on modern tools of industrial cyber-physical systems are proposed. The problems of increasing the control operations efficiency in the conditions of digital production, as well as approaches to training future engineers are considered.

Yu. S. ANDREEV

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics*

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК,
ПОСВЯЩЕННЫЙ ПАМЯТИ Е. И. ЯБЛОЧНИКОВА**
SPECIAL ISSUE DEDICATED TO THE MEMORY OF E. I. YABLOCHNIKOV

УДК 65.01:621.9:658.5:65.011.56:004.9
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА
В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

К. П. Помпеев¹, О. С. Тимофеева^{1*}, Е. И. Яблочников¹, Е. Е. Волосатова²

¹ *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
**olga2957869@mail.ru*

² *Техприбор, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Рассматриваются вопросы информационной интеграции конструкторской и технологической подготовки производства. Предложена методика построения 3D-моделей деталей, основанная на использовании унифицированных и типовых конструктивно-технологических элементов с учетом их структурных уровней. Применение методики облегчает возможность трансформации моделей при решении технологических задач, в том числе для построения моделей операционных заготовок, расчета технологических размеров, разработки управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением. Предлагаемая методика наиболее эффективна при внедрении в производство многооперационных цифровых технологических процессов.

Ключевые слова: конструкторская подготовка производства, технологическая подготовка производства, единое информационное пространство, жизненный цикл изделия, цифровая модель изделия, 3D-модель детали, технологический процесс, 3D-модель операционной заготовки, станок с ЧПУ

Ссылка для цитирования: Помпеев К. П., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И., Волосатова Е. Е. Автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка в условиях цифрового производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 7—15. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15.

**AUTOMATED DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION
IN THE CONDITIONS
OF DIGITAL PRODUCTION**

K. P. Pompeev¹, O. S. Timofeeva^{1*}, E. I. Yablochnikov¹, E. E. Volosatova²

¹ *ITMO University, St. Petersburg, Russia*
olga2957869@mail.ru

² *JSC Techpribor, St. Petersburg, Russia*

Abstract. The problems of information integration of design and technological preparation of production are considered. A technique for constructing 3D models of parts based on the use of unified and standard structural and technological elements with the account of their structural levels and directed formation of each part model, is described. Application of the proposed methodology facilitates the possibility of transforming models when solving technological problems, including for construction of operational blanks models, calculating technological dimensions, and developing control programs for equipment with numerical control. The described method is most effective when introducing multi-operational digital technological processes into production.

Keywords: design preparation of production, technological preparation of production, unified information space, product life cycle, digital model of a product, 3D model of a part, technological process, 3D model of an operational workpiece, CNC machine

For citation: Pompeev K. P., Timofeeva O. S., Yablochnikov E. I., Volosatova E. E. Automated design and technological preparation in the conditions of digital production. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 7—15 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15.

Введение. Один из важнейших этапов жизненного цикла изделий — технологическая подготовка производства (ТПП). Службы предприятия, отвечающие за процесс ТПП, являются связующим звеном между конструкторскими и производственными подразделениями. Трехмерные модели изделий служат в данном случае средством интеграции специалистов различных подразделений.

На промышленных предприятиях достаточно обширна практика использования различных систем трехмерного моделирования. Переход на единую цифровую платформу требует значительных инвестиций и массового переобучения персонала. Поэтому основным направлением повышения эффективности интегрированных бизнес-процессов, использующих трехмерные модели, является создание методик и способов работы с такими моделями в разнородной среде.

Процессы проектирования, производства и контроля внутри предприятия могут быть организованы с использованием трехмерных моделей, аннотации которых содержат все необходимые технологические и технические требования. Решение этой задачи позволит кардинально сократить длительность производственных процессов и обеспечить лучшую готовность предприятия к использованию систем моделирования технологических процессов (ТП) и новых производственных технологий, в том числе аддитивных.

Цифровая модель изделия как основа организации и совершенствования конструкторско-технологической подготовки производства. Одним из важнейших направлений развития современной экономической модели является „цифровизация“ производственных и технологических процессов в различных отраслях промышленности. Переход к модели цифровой экономики связан с появлением такой важной ее составляющей, как „цифровое производство“ [1, 2], где центральную роль играет цифровая модель изделия совместно с моделями сборочных единиц (узлов) и деталей на всех этапах жизненного цикла изделий, для информационной интеграции которых используются PDM-системы [3].

В настоящее время активно рассматривается вопрос организации цифрового производства как множества взаимодействующих киберфизических систем (КФС) [1, 4]. Одной из таких систем является цифровой двойник операционной заготовки (ОЗ), который должен определять последующий производственный ресурс для обработки с учетом текущего состояния производственной системы. Таким образом, 3D-модель ОЗ будет играть главную интегрирующую роль при подготовке и организации производства (рис. 1).

Увеличение длительности процесса ТПП и снижение его качества происходит из-за низкой интеграции в работе конструкторов и технологов на уровне передачи и использования 3D-моделей. Обеспечить повышение интеграции можно при условии создания конструкторами 3D-моделей деталей с использованием принципов и методики, описанных в [5]. Повысить же качество работы технологов позволит применение методики создания перестраиваемых 3D-моделей ОЗ для многооперационных ТП [2]. При этом технолог-программист для разработки управляющих программ будет использовать переданные ему 3D-модели ОЗ, описывающие состояние изделия на входе проектируемой операции и на ее выходе. Основные задачи технолога в этом случае — выбор/определение режущего инструмента (в том числе, его материала) для обеспечения производительности при предварительной обработке заготовки [6—8] либо точности и шероховатости поверхностей, формируемых в результате окончательной обработки [9—14], а также определение структуры операции и режимов резания [6, 8, 15].



Рис. 1

Принципы создания 3D-моделей деталей на этапе конструкторской подготовки производства. В современных условиях исходной информацией для проектирования маршрутной технологии является конструкторская аннотированная 3D-модель изготавливаемой детали, которая может передаваться конструктором технологу через прямой интерфейс или обменные файлы в одном из стандартных форматов (igs, stp, dxf, dwg и др.).

3D-модель детали целесообразно конструировать из унифицированных и типовых элементов. Каждый конструктивный элемент (КЭ) имеет определенное назначение и набор параметров, характеристик и свойств, от сочетания которых зависит тот или иной способ его производства. При этом конструктору следует учитывать технологичность КЭ и возможность его изготовления в действующем производстве. Следовательно, можно уже говорить о конструктивно-технологических элементах, из которых следует конструировать 3D-модель детали.

При использовании технологом конструкторской 3D-модели детали могут возникать сложности ее трансформации в множество 3D-моделей ОЗ, вызванные одной из следующих причин:

а) конструкторская 3D-модель детали, переданная через обменный файл в одном из стандартных форматов, воспринимается CAD-системой как единое целое без дерева построения;

б) конструкторская 3D-модель детали передана технологу через прямой интерфейс вместе с деревом ее построения, однако конструктором при проектировании не предусмотрена возможность такой трансформации.

Согласно [5, 16, 17] только при последовательном построении 3D-моделей деталей любого типа из простых унифицированных и типовых конструктивных элементов появляется возможность независимого управления их параметрами в ходе конструкторско-технологической подготовки производства. Следовательно, 3D-модели деталей должны быть разработаны конструктором с учетом следующих условий:

- возможность декомпозиции детали на элементы;
- возможность корректировки параметров отдельных элементов;
- строгая направленность формирования структуры детали из конструктивных элементов.

Это позволит сократить трудоемкость процессов трансформации и корректировки 3D-модели в соответствии с разработанной последовательностью технологического процесса ее изготовления „от детали к исходной заготовке“.

Согласно системному подходу [18], в структуре деталей типа тел вращения целесообразно выделить элементы вращения I, II и III уровней и плоскостные элементы, их ограничивающие [5]. Разделение элементов по уровням связано с учетом таких конструктивно-технологических признаков, как геометрическая характеристика элементов; топологическая связь элементов (положение, сопряжение, пересечение); заранее установленная последовательность формирования элементов в ходе изготовления детали.

Элемент вращения (ЭВ) условно обозначается как $ЭВ_n^N$, где N — номер уровня (I, II или III), n — порядковый номер элемента вращения внутри каждого уровня. Так, элементами I уровня являются наружные и внутренние цилиндрические поверхности деталей, открытые с одной или двух сторон и имеющие общую ось вращения — ось вращения детали. К элементам II уровня относятся поверхности деталей, которые топологически пересекаются или объединяются с элементами I уровня и имеют с ними общую ось вращения, — к ним относятся фаски, канавки, конусы, резьбы и пр. Остальные поверхности деталей являются элементами III уровня.

Система координат XYZ при „нулевом“ положении пространства построения модели является глобальной, от нее должно начинаться построение модели детали. Остальные системы координат, используемые для построения отдельных конструктивных элементов, локальные.

Разработку 3D-моделей деталей типа тел вращения в CAD-системе следует проводить с соблюдением указанных ниже принципов.

1. Использование функций твердотельного моделирования для создания конструктивных элементов 3D-модели детали.

2. Соответствие приоритета создания элементов 3D-модели детали их уровню.

3. Строго определенное направление создания элементов детали — слева направо (снизу вверх) от главной плоскости XOY.

4. Плоскость эскиза для создания последующего элемента I уровня — смежная грань предыдущего элемента I уровня.

5. Создание групп элементов II или III уровня с использованием функции копирования эскизов.

Общий алгоритм построения 3D-моделей деталей типа тел вращения можно представить последовательностью:

- создание наружных элементов I уровня;
- создание внутренних элементов I уровня;
- создание элементов II уровня, расположенных на элементах I уровня;
- создание необходимых локальных систем координат и плоскостей, определяющих расположение элементов III уровня;
- создание элементов III уровня, расположенных на элементах I уровня;
- аннотирование 3D-модели детали.

Перечисленные принципы и представленный алгоритм построения 3D-моделей деталей типа тел вращения являются основой для автоматизации самого процесса моделирования и позволяют разработать такую модель детали, в которой можно управлять параметрами каждого отдельного КЭ при трансформации этой модели.

Методика построения 3D-модели детали. На основании представленных выше принципов и алгоритма была разработана методика построения 3D-модели.

1. Построение ряда вспомогательных плоскостей для моделирования наружной конфигурации детали, начиная от глобальной системы координат. Расположение плоскостей друг относительно друга должно соответствовать требуемой структуре конструкторских размеров.

2. Последовательное построение элементов детали путем добавления материала выдавливанием до соответствующих вспомогательных плоскостей.

3. Построение ряда вспомогательных плоскостей для моделирования внутренней конфигурации детали.

4. Последовательное построение внутренних элементов I уровня посредством удаления материала выдавливанием.

5. Последовательное построение слева направо элементов II уровня: сначала на наружных элементах I уровня, а затем на внутренних.

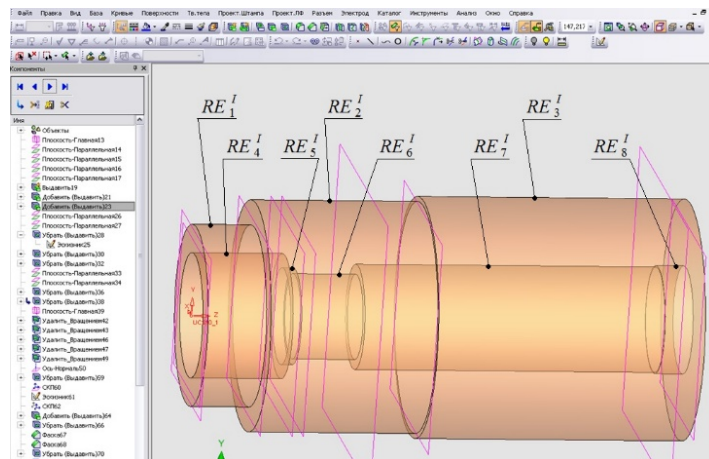
6. Построение необходимых локальных систем координат и вспомогательных плоскостей, определяющих расположение элементов III уровня.

7. Последовательное построение слева направо элементов III уровня: сначала на наружных элементах первого уровня, а затем на внутренних.

8. Аннотирование 3D-модели детали.

Данную методику авторы называли „методикой направленного построения 3D-моделей деталей“. Для ее иллюстрации построена 3D-модель детали „корпус“ в CAD-модуле системы Cimatron. Использование вспомогательных плоскостей в качестве ссылки при построении модели дает возможность легко перестроить ее, если необходимо изменить структуру линейных размеров детали. Результат построения наружных и внутренних элементов I уровня (RE_{1-8}^I) приведен на рис. 2, а, а элементов II уровня — на рис. 2, б.

а)



б)

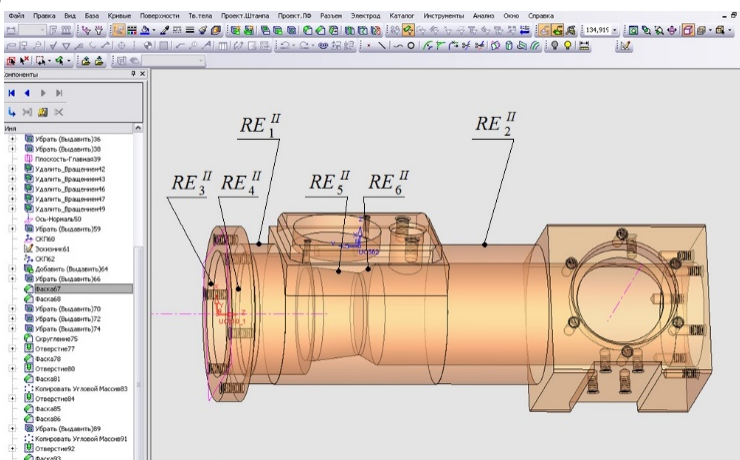


Рис. 2

Для построения элементов III уровня потребуется создание локальных систем координат, которые можно использовать при разработке управляющих программ в САМ-системе. Строго определенная направленность и очередность создания 3D-модели детали из унифицированных и

типовых КЭ позволяет формализовать процесс построения 3D-моделей и тем самым создать предпосылки для его автоматизации путем разработки программ их автоматического построения в CAD/CAM-системах средствами API (Application Programming Interface).

Предлагаемая методика построения 3D-моделей деталей типа тел вращения (которая, в сущности, применима к созданию 3D-моделей деталей, не являющихся телами вращения) позволяет конструктору создавать 3D-модели, пригодные для дальнейшего использования технологиями, в частности для создания 3D-моделей ОЗ [2, 19, 20]. Также 3D-модели ОЗ и операционные эскизы или аннотированные 3D-модели ОЗ соответствующих операций передаются специалисту по программированию работы координатно-измерительной машины. Разработка программ измерений проводится по номиналам технологических размеров, указанных в операционных эскизах или в аннотациях 3D-моделей ОЗ. Предлагаемая методика позволяет технологу эффективно использовать 3D-модели ОЗ для различных целей, что существенно экономит рабочее время.

Принципы и методика построения 3D-моделей ОЗ с учетом результатов предварительно проведенного размерного анализа проектируемого ТП описаны в [2], а методика синтеза размерных схем ТП представлена в [18, 21, 22]. При этом автоматизированный расчет технологических линейных размерных цепей проводится на max-min по методу полной взаимозаменяемости [18], что позволяет:

- гарантировать обеспечение точности размеров и технических требований;
- исключить вероятность получения неисправимого брака;
- исключить или существенно снизить влияние человеческого фактора на качество изготовления деталей.

На рис. 3 перечислено множество моделей ОЗ в их логической последовательности согласно технологическому процессу. Для одной из операций ТП представлены модели ОЗ до выполнения операции (полупрозрачный вид) и после нее. Выбор двух последовательных моделей из перечня позволяет разработчику управляющей программы определить исходное и конечное (промежуточное) состояния заготовки.

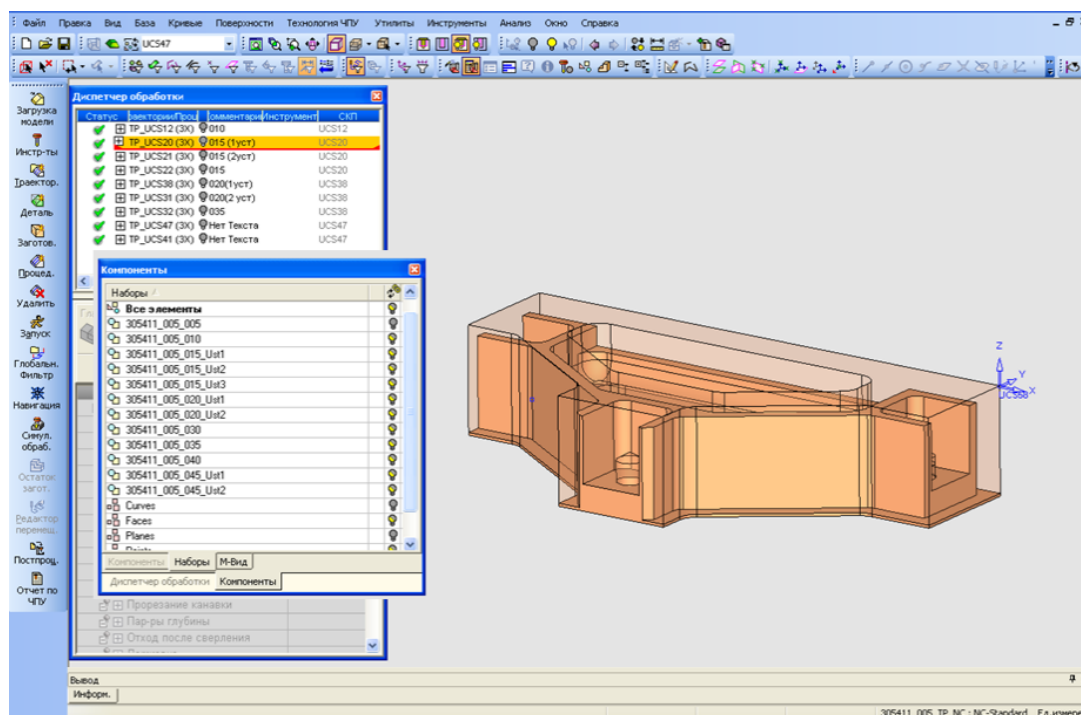


Рис. 3

Практическое использование описанной в [2] методики проектирования операций на станках с ЧПУ показало, что время разработки операций средней сложности, в которых задействовано 5...7 режущих инструментов, сокращается с 1,5...2 до 0,5 ч.

Заключение. Цифровая 3D-модель детали, с одной стороны, является информационным объектом в процессах проектирования и производства, а с другой — ключевым объектом для эффективной интеграции деятельности разных специалистов.

Цифровая 3D-модель детали может быть представлена в разных форматах и соответственно использоваться в различных САПР ТП, CAD/CAM/CAE- и PDM-системах, системах верификации для осуществления различных преобразований. В ходе таких преобразований создаются цифровые модели операционных заготовок, которые имеют непосредственную связь с цифровыми моделями оснастки и инструмента. При этом создается большой объем технологических данных, разрабатываются различные модели объектов и процессов, формируется информация о ресурсообеспечении. Таким образом, формируется цифровой технологический процесс, состоящий из цифровых моделей детали (изделия), операционных заготовок и связанных с ними технологической оснастки и инструмента. Кроме того, цифровой технологический процесс включает совокупность управляющих программ обработки заготовок и программ измерений. Это согласуется с концепцией построения „умного производства“, реализация которой связана с требованиями повышения уровня автоматизации, коммуникаций в производственной системе, ухода человека от рутины в область инженерного творчества и др. Для этого требуется более детально разрабатывать модели и процессы на основе унификации и стандартизации. Формируемая на этапе конструкторской подготовки производства цифровая модель детали рассматривается с точки зрения интеграции работы конструкторов, технологов и контролеров. Предложенная методика построения 3D-моделей деталей наиболее эффективна при внедрении в производство многооперационных цифровых технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manzei C., Schleupner L., Heinze R. Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Berlin: VDE Verlag, 2017. 302 s.
2. Помпеев К. П., Абрамян К. В., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Технологическая подготовка производства деталей на станках с ЧПУ с использованием перестраиваемых 3D-моделей операционных заготовок // Металлообработка. 2020. № 4(118). С 50—59. DOI: 10.25960/mo.2020.4.50.
3. ZuMin Wang, AiLing Wang, Wei Liu. PDM system study based on web // Mech. Manage. Develop. 2004. N 02. P. 72—73.
4. Абрамян К. В., Помпеев К. П., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Применение систем моделирования при формировании инженерных компетенций в области цифрового производства // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб: Политех-пресс, 2019. С. 3—14.
5. Принципы разработки трехмерных моделей деталей вращения для их использования в технологическом проектировании / В. И. Аверченков, К. П. Помпеев, Л. В. Одинцова, В. К. Лопарев // Информационные технологии на транспорте: Сб. науч. тр. СПб: Политехника, 2003. С. 3—11.
6. Mavliutov A. R., Zlotnikov E. G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. N 327(4). P. 042069.
7. Maksarov V., Khalimonenko A. Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools // Intern. Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 12, iss. 5. P. 437—441.
8. Yang Y. Machining parameters optimization of multi-pass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism // CMES — Computer Modeling in Engineering and Sciences. 2018. Vol. 116, iss. 3. P. 365—389.
9. Das S. R., Panda A., Dhupal D. Analysis of surface roughness in hard turning with coated ceramic inserts: Cutting parameters effects, prediction model, cutting conditions optimization and cost analysis // Ciencia e Tecnica Vitivinicola. 2017. Vol. 32. P. 127—154.
10. Bezyazychny V. F., Sutyagin A. N., Bolotein A. N. Modeling a 3D surface roughness of mating parts produced with lathe turning // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. N 194(2). P. 022005.

11. Joshi V., Kumar H. Optimization of CNC Lathe Turning: A Review of Technique, Parameter and Outcome // *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2021. P. 963—973.
12. Kovač P. et al. Modelling and Optimization of Surface Roughness Parameters of Stainless Steel by Artificial Intelligence Methods // *Proc. of the Intern. Symp. for Production Research (ISPR). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019. P. 3—12.
13. Jha H., Panpalia A., Suneja D., Ashpilya G., Kumar H., Gautam V. () Estimation of Surface Roughness in Turning Operations Using Multivariate Polynomial Regression // *Advances in Industrial and Production Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2021. P. 947—957.
14. Andreev Y. S., Isaev R. M., Lubiviy A. V. Improvement of piezoelectric vibration sensors' performance characteristics via optimization of details' functional surfaces roughness // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 1015. P. 052010.
15. Jamaludin Z., Shamshol Ali N. A., Rafan N. A., Abdullah L. Effect of Cutting Forces on Surface Roughness for Varying Depth of Cut and Feed Rates in Milling Machining Process // *Intelligent Manufacturing and Mechatronics. SymptoSIMM. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2019. P. 195—203.
16. Бабанин В. С. Методика создания конструкторско-технологической модели детали в среде CAD-системы // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57, № 8. С. 21—25.
17. Chlebus E., Krot K. CAD 3D Models Decomposition in Manufacturing Processes // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16, iss. 1. P. 20—29. DOI: 10.1016/j.acme.2015.09.008.
18. Валетов В. А., Помпеев К. П. Технология приборостроения: Учеб. пособие СПб: СПбГУ ИТМО, 2013. 234 с.
19. Бабанин В. С. Параметрическое моделирование операционных заготовок // *Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. „Современное машиностроение. Наука и образование“*. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 577—584.
20. Kulikov D., Yablochnikov E., Vostropyatov A., Arnst A. Method of automated design of operating the workpieces in a CAD system environment // *IEEE 15th Intern. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*. 2017. P. 96—102. DOI: 10.1109/INDIN.2017.8104753.
21. Pompeev K. P., Pleshkov A. A., Borbotko V. A. Interactive Synthesis of Technological Dimensional Schemes // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 122—135.
22. Помпеев К. П. Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надежных технологий // *Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. „Современное машиностроение. Наука и образование“*. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 600—609.

Сведения об авторах

Кирилл Павлович Помпеев

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: kir-pom@mail.ru

Ольга Сергеевна Тимофеева

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: olga2957869@mail.ru

Евгений Иванович Яблочников

— канд. техн. наук, доцент

Елена Евгеньевна Волосатова

— Техприбор, бюро CAD/CAM-технологий; начальник бюро; E-mail: ee.volosatova@gmail.com

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. Manzei C., Schleupner L., Heinze R. *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*, Berlin, VDE VERLAG, 2017, 302 s.
2. Abramyan K.V., Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. *Metalloobrabotka*, 2020, no. 4(118), pp. 50—59, DOI 10.25960/mo.2020.4.50. (in Russ.)
3. ZuMin Wang, AiLing Wang, Wei Liu, *Mech. Manage. Develop.*, 2004, no. 02, pp. 72—73.
4. Abramyan K.V., Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. *Sovremennoye mashinostroyeniye: Nauka i obrazovaniye: materialy* (Modern Engineering: Science and Education), Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2019, pp. 3—14. (in Russ.)
5. Averbchenkov V.I., Pompeev K.P., Odintsova L.V., Loparev V.K. *Informatsionnyye tekhnologii na transporte* (Information Technology in Transport), Collection of scientific papers, St. Petersburg, 2003, pp. 3—11. (in Russ.)

6. Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 4(327), pp. 042069.
7. Maksarov V., Khalimonenko A. *International Review of Mechanical Engineering*, 2018, no. 5(12), pp. 437–441.
8. Yang Y. *CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2018, no. 3(116), pp. 365–389.
9. Das S.R., Panda A., Dhupal D. *Ciencia e Tecnica Vitivinicola*, 2017, vol. 32, pp. 127–154.
10. Bezyazychny V.F., Sutyagin A.N., Bolotein A.N. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 2(194), pp. 022005.
11. Joshi V., Kumar H. *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 2021, pp. 963–973.
12. Kovač P. et al. *Proceedings of the International Symposium for Production Research, ISPR 2019, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, 2020, pp. 3–12.
13. Jha H., Panpalia A., Suneja D., Ashpilya G., Kumar H., Gautam V. *Advances in Industrial and Production Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 2021, pp. 947–957.
14. Andreev Y.S., Isaev R.M., Lubiviy A.V. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, pp. 052010.
15. Jamaludin Z., Shamshol Ali N.A., Rafan N.A., Abdullah L. *Intelligent Manufacturing and Mechatronics. SympoSIMM 2019, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 2020, pp. 195–203.
16. Babanin V.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 8, pp. 21–25. (in Russ.)
17. Chlebus E., Krot K. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016, no. 1(16), pp. 20–29, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.008>.
18. Valetov V.A., Pompeev K.P. *Tekhnologiya priborostroyeniya* (Instrumentation Technology), St. Petersburg, 2013, 234 p. (in Russ.)
19. Babanin V.S. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* (Modern Mechanical Engineering. Science and Education), Materials of the Third International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2013, pp. 577–584. (in Russ.)
20. Kulikov D., Yablochnikov E., Vostropiatov A., Arnst A. *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2017, pp. 96–102, DOI: 10.1109/INDIN.2017.8104753.
21. Pompeev K.P., Pleshkov A.A., Borbotko V.A. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 122–135.
22. Pompeev K.P. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* (Modern Mechanical Engineering. Science and Education), Materials of the Third International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2013, pp. 600–609. (in Russ.)

Data on authors

Kirill P. Pompeev	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: kir-pom@mail.ru
Olga S. Timofeeva	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: olga2957869@mail.ru
Evgeny I. Yablochnikov	—	PhD, Associate Professor
Elena E. Volosatova	—	JSC Techpribor, CAD/CAM Technologies Bureau; Head of the Bureau; E-mail: ee.volosatova@gmail.com

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА
ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

А. В. Чукичев, О. С. Тимофеева*, Ю. С. Андреев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*olga2957869@mail.ru

Аннотация. Представлен обзор современных интеллектуальных подходов к автоматизации, используемых на различных этапах технологической подготовки производства полимерных изделий методом литья под давлением. На основе обзора литературы предложена схема технологической подготовки с использованием рассматриваемых методов, которая позволит повысить ее эффективность.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, литье под давлением, распознавание конструктивно-технологических элементов, проектирование литьевой формы, режимы литья

Ссылка для цитирования: Чукичев А. В., Тимофеева О. С., Андреев Ю. С. Интеллектуальные подходы к автоматизации технологической подготовки производства полимерных изделий методом литья под давлением // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 16—24. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-16-24.

**INTELLIGENT APPROACHES TO AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION
FOR POLYMER PRODUCTS MANUFACTURING
BY INJECTION MOLDING**

A. V. Chukichev, O. S. Timofeeva*, Yu. S. Andreev

ITMO University, St. Petersburg, Russia
olga2957869@mail.ru

Abstract. A review of modern intelligent automation approaches used at various stages of technological preparation for polymer products production by injection molding is presented. Based on the literature review, a scheme of technological preparation using the considered methods is proposed, which is aimed at increasing its efficiency.

Keywords: technological production preparation, injection molding, feature recognition, mold design, molding modes

For citation: Chukichev A. V., Timofeeva O. S., Andreev Yu. S. Intelligent approaches to automation of technological preparation for polymer products manufacturing by injection molding. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 16—24 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-16-24.

Постоянно возрастающие требования, связанные с повышением сложности продукции и технологических процессов (что проявляется, например, в сокращенном жизненном цикле продукции, большом числе ее модификаций и дефиците времени и средств), определяют ключевые проблемы, с которыми сталкиваются современные производственные предприятия.

Эффективность технологической подготовки производства (ТПП) изделия имеет решающее значение как для сроков его изготовления, так и для его себестоимости. Одним из основных показателей, определяющих эффективность ТПП, является длительность цикла при условии сохранения качества изготавливаемых изделий (см. ГОСТ Р ИСО 18828-4-2020). Проблема повышения эффективности ТПП мотивирует исследователей на разработку новых подходов с использованием современных производственных и информационных технологий, однако полная автоматизация ТПП является сложной задачей в большинстве производственных областей, в том числе и в области приборостроения [1].

Термопластичные полимерные материалы (ТПМ) на сегодняшний день используются практически во всех отраслях промышленности. Согласно статистическим данным [2], в 2020 г. мировое производство пластмасс составило более 368 млн тонн, 62 млн тонн в Европе и 4 млн тонн в России. Конструкции современных приборов, как правило, содержат множество полимерных деталей (корпуса, крышки, кнопки, экраны и пр.). Применение ТПМ для изготовления деталей предоставляет конструктору возможность проектирования более сложной конфигурации деталей, возможность выбора текстуры и цвета. Кроме того, детали из ТПМ имеют меньшую массу, что является несомненным преимуществом по сравнению с металлическими аналогами.

Один из основных методов изготовления деталей из пластмасс со сложной геометрией и точными размерами — литье под давлением. При технологической подготовке литьевого производства проектирование оснастки и разработка технологического процесса зачастую занимают больше времени, чем непосредственно литье. Для быстрого выполнения заказов необходимо повышать эффективность ТПП, поэтому исследования по разработке методов сокращения ее длительности являются актуальными.

Согласно обзору [3], современные исследования в области САПР ТП направлены на развитие и применение технологий, основанных на методах распознавания конструктивных элементов, знаниях, генетических алгоритмах, теории нечетких множеств, сетях Петри, агентах.

Распознавание конструктивно-технологических элементов (КТЭ) рассматривается в качестве основного инструмента для систем автоматизированного проектирования. Такой инструмент обеспечивает связь между системами проектирования изделия и системами, используемыми на этапах ТПП. При автоматическом распознавании КТЭ (AFR — Automatic Feature Recognition) низкоуровневые геометрические элементы моделей деталей, которые создаются в системах CAD, преобразуются в набор КТЭ, который может быть использован далее в САПР ТП и САМ-системах. Существует четыре базовых подхода к распознаванию элементов [4] — на основе подсказок, графов, объемной декомпозиции и нейронных сетей (ANN — Artificial Neural Network). Все они имеют свои возможности и ограничения.

Существенным недостатком графовых методов является их неспособность обрабатывать произвольные взаимодействия КТЭ. Это связано с тем, что взаимодействие элементов может разрушить топологию самих элементов и, следовательно, привести к отсутствию связей в графе. Системы же, основанные на подсказках, способны обрабатывать произвольные взаимодействия КТЭ, используя преимущества человеческого знания, однако им не хватает общих схем представления элементов, позволяющих расширить область распознавания на широкий спектр элементов. Объемная декомпозиция КТЭ недостаточно полно отражает геометрическую и топологическую информацию об элементах, поэтому этот способ не используется для распознавания типов КТЭ. Кроме того, поскольку процесс декомпозиции основан на расширении граней и ребер, твердотельные модели, имеющие свободную форму граней, не могут быть обработаны должным образом.

По сравнению с обычными методами распознавания элементов ANN не реализуют никаких явных операций рассуждения [5]. Однако, выполняя только арифметические операции, они могут получать разнообразные знания и обнаруживать закономерности посредством обучения неявных входных паттернов, которые трудно адекватно описать с помощью систем, основанных на знаниях. Второе преимущество использования ANN при распознавании элементов заключается в возможности допускать исключения или неполные входные паттерны, что, в свою очередь, позволяет распознавать неперпендикулярные взаимодействующие элементы. Построение входной схемы представления элементов является наиболее важной частью использования ANN при распознавании. Производственные характеристики элементов могут быть представлены как топологической, так и геометрической информацией, полученной из модели САПР, в то время как в нейронных сетях входными данными обычно являются

числовые значения. Поэтому возникает проблема преобразования твердотельной модели в подходящее входное представление для нейронных сетей.

Очевидно, что для преодоления недостатков данных методов необходимо разрабатывать гибридные системы, позволяющие использовать именно преимущества вышеуказанных методов автоматического распознавания КТЭ.

Различные аспекты проектирования технологических процессов классифицируются в соответствии с требуемыми входными и выходными данными [3]. Входные данные САПР ТП содержат конструкторскую документацию, информацию об изделии (геометрические размеры и допуски, требования к качеству поверхностей и их взаимному расположению, материал изделия), базу средств технологического оснащения (СТО) — технологическое оборудование, оснастку, приспособления и инструменты. Входные данные должны быть проанализированы, чтобы обеспечить возможность проектирования технологического процесса с учетом доступности оборудования и возможностей производства. В общем случае в результате работы САПР ТП определяются метод изготовления изделия, последовательность операций, необходимые инструменты, режимы обработки, используемые СТО, оцениваются время и затраты на изготовление детали.

На выбор метода изготовления полимерного изделия, помимо характеристик материала, влияет и геометрия изделия. Выбор метода литья под давлением зависит в первую очередь от возможности извлечения отливки из литейной формы [1]. Большинство первоначально разработанных методов проверки извлекаемости изделия были неполными, так как выбирались некоторые эвристические направления, вдоль которых проверялась возможность извлечения изделия из литейной формы с использованием того или иного способа моделирования. В работе [6] предложены теоретические алгоритмы для проверки пригодности детали к литью в заданном направлении и вычисления возможных направлений разделения формы на две части путем обхода всех вершин, ребер и граней в пространственном расположении описанных окружностей и дуг окружностей. Алгоритм, основанный на графах конструктивных элементов, для решения задачи извлекаемости отливки произвольной геометрии из литейной формы, состоящей из двух частей, разработан в [7]. Авторами работы [8] также представлены новые алгоритмы, использующие программируемое графическое оборудование для проверки формемости деталей.

Формирование технологического маршрута операций является основной задачей большинства САПР ТП. Результат решения этой задачи зависит от множества факторов, таких как типы и количество доступных станков, доступные инструменты и приспособления, характеристики деталей, допуски и требуемая термообработка. В работе [9] использован граф смежности для представления КТЭ САД-модели в целях распознавания пересекающихся элементов и генерации технологического плана. Основанная на распознавании КТЭ модель данных, отображающих историю процесса обработки для планирования производственного процесса изготовления деталей самолета, построена в [10]. Авторами работы [11] предложен базирующийся на конкретных правилах подход к распознаванию элементов для облегчения разработки системы САПР ТП. В [12] представлена основанная на распознавании КТЭ модель комплексной детали для перенастройки плана технологического процесса обработки новой детали из той же группы. Таким образом, базирующиеся на распознавании КТЭ технологии облегчают проектирование технологического процесса. Однако представленные работы также требуют разработки детализированного дескриптора КТЭ, что является трудоемкой задачей.

Для сформированных операций технологического маршрута необходимо назначить режимы соответствующего процесса. Так, для обеспечения качества полимерного изделия десятки параметров процесса литья под давлением должны быть настроены на основе информации, получаемой от поставщиков материалов, разработчиков литейных форм и производителей машин. Традиционно режимы литья определяются путем получения первичных данных

из специализированных САПР или методом проб и ошибок. Оба метода предполагают выполнение пробных отливок, после чего оценивается качество полученных деталей. Затем персонал, используя свои знания о процессе, осуществляет настройку режимов литья. Пробные запуски повторяются до тех пор, пока не будут выполнены все требования к качеству продукта [13]. Этот метод требует не только значительных временных затрат, но и высокой квалификации персонала.

Даже опытному технологу не под силу учесть все особенности процесса литья прежде, чем будет получена первая отливка, а текущее состояние САПР ТП не позволяет оперативно назначать режимы литья. В связи с этим в последнее время среди исследователей в области технологической подготовки литьевого производства наблюдается рост интереса к искусственному интеллекту.

Системы на основе искусственного интеллекта не только широко используются в различных отраслях науки и техники, но и, более того, предусматривают применение значительного количества датчиков для сбора данных на всех этапах жизненного цикла продукта. В последнее время приложения для интеллектуального анализа данных разрабатываются для получения знаний в современных производственных средах. В [14] представлен обзор приложений интеллектуального анализа данных в производстве, а в [15] — прототип интеллектуального анализа данных для диагностики неисправностей. Системы на основе искусственного интеллекта используются для подбора параметров процесса литья под давлением, а также для обнаружения дефектов.

Исследователями предложены различные интеллектуальные методы для автоматического определения параметров процесса литья. К таким методам относятся методы рассуждений на основе прецедентов (CBR — Case-Based Reasoning), методы на основе экспертных систем и методы аппроксимации и оптимизации данных, в частности метод Тагучи [16, 17], искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, методология поверхности отклика [18, 19].

Основное предположение при использовании метода CBR заключается в том, что схожие задачи имеют аналогичные решения. CBR состоит из пяти основных процессов, которые сводятся к уточнению, извлечению, повторному использованию, пересмотру и сохранению информации, связанной с задачей. На этапе уточнения данная новая задача (запрос) должна быть передана в CBR-модуль в формате структуры обращения (параметры и значения). На втором этапе, с использованием меры сходства, новая задача сравнивается с базой документированных задач и выбираются наиболее похожие. Предлагаемые решения по этим задачам служат исходным материалом для третьего этапа CBR. На этапе повторного использования следует применять различные методы, например, основанные на правилах, для преобразования предыдущих аналогичных решений или некоторых их частей [20].

Было установлено, что метод CBR исключительно эффективен при определении начальных параметров процесса литья под давлением. В [21] впервые разработана система CBR для получения режимов литья. Этот метод был принят в последующих работах [22, 23]. Геометрические характеристики полимерного изделия и физические свойства материала выбираются в качестве исходных данных. Оптимальные параметры процесса принимаются как часть решения. Чтобы упростить поиск прецедентов, все случаи индексируются путем определения показателей подобия, таких как тип материала, геометрия изделия и конфигурация полости литьевой формы. Затем параметры процесса в аналогичных случаях адаптируются к новой задаче с использованием стратегий адаптации.

Другой интеллектуальный метод автоматического определения параметров процесса литья основан на экспертных системах, которые имитируют процесс принятия решений специалистом-экспертом. В соответствии с различными формами представления знаний методы, основанные на экспертных системах, можно разделить на методы, базирующиеся на знаниях (KBR — Knowledge-Based Reasoning) [24], правилах (RBR — Rule-Based Reasoning) [25]

и нечеткой логике. В частности, метод нечетких рассуждений основывается на теории нечеткой логики и может эффективно моделировать качественные аспекты человеческого знания и процессов рассуждения с помощью нечетких правил „если-то“. Например, „процесс должен быть выполнен на машине для литья под давлением“ или „испытание литьевой формы обязательно“ [26]. Метод на основе нечеткой логики эффективен для решения задач устранения дефектов изделия. Он позволяет определить направление коррекции и диапазон регулировки параметров процесса. Однако диапазон корректировки параметров определяется серьезностью дефектов, что связано с уточнением их степени, исключая предвзятость оператора, и обеспечением согласованности результатов диагностики.

Методы аппроксимации данных и оптимизации оценивают полноту различных методов. В литье под давлением широко используются экспериментальные методы проектирования. Среди методов планирования эксперимента наибольшее распространение получил метод Тагути. На основе трех типов анализа (анализ диапазона, дисперсионный анализ и анализ отношения сигнал-шум) метод Тагути можно использовать для выявления степени влияния различных параметров процесса на качество продукта и определения оптимальных параметров процесса для конкретного показателя качества продукта. Авторы работы [26] провели эксперименты по методу Тагути для определения значимых факторов, а авторы работы [27] использовали метод Тагути для определения влияния параметров процесса на коробление. Однако используя этот метод, можно найти только наилучшие комбинации заданного уровня параметров процесса, но не глобальное оптимальное решение.

Для определения оптимальных параметров процесса литья также был введен ряд методов моделирования. Автоматизированное проектирование (CAE) широко используется при изготовлении полимерных изделий методом литья под давлением для поиска оптимальных параметров процесса [28, 29]. Кроме того, многие исследователи сосредоточились на поиске суррогатных моделей, таких как искусственная нейронная сеть, регрессия опорных векторов и метод поверхности отклика. Эти суррогатные модели рассматриваются как математическое приближение вместо фактического имитационного анализа. В работе [30] минимизирована глубина усадки в полимерных изделиях, отлитых под давлением, путем интеграции анализа потока методом конечных элементов с центральным композитным дизайном экспериментов и генетическим алгоритмом. Согласно результатам, предложенная методология может быть эффективной. В [31] условия процесса были оптимизированы, чтобы минимизировать деформацию деталей литья под давлением с помощью модели ANN. Для оптимальной настройки параметров с лучшим управлением в [32] была использована радиальная базисная нейронная сеть (RBN) для определения искажений контура изделий из полипропиленового композита. В [33] интегрирована нейронная сеть обратного распространения (BPNN) с оптимизацией роя частиц, чтобы помочь технологам определить оптимальные условия процесса [34].

Следует отметить, что при использовании упомянутых методов подбора режимов литья под давлением предполагается, что конструкция детали и литьевой формы установлены и фиксированы. Тем не менее в процессе ТПП полимерных изделий литьем под давлением этап проектирования литьевой формы является одним из наиболее трудоемких.

Система проектирования литниковой системы с параметрическим управлением [35] базируется на методологии проектирования формирующей полости литьевой формы путем управления геометрическими параметрами стандартных шаблонов различных конфигураций. Это гарантирует, что требуемая конфигурация может быть загружена в конструкцию сборки литьевой формы, без необходимости перепроектировать компоновку. Кроме того, параметрическое представление обеспечивает хранение знаний.

По результатам представленного обзора литературы можно сделать вывод, что современное развитие методов и инструментов в области машинного обучения и разработки

интеллектуальных систем позволяет исключить или заменить некоторые этапы процесса ТПП, что, в свою очередь, позволит сократить его длительность.

Использование многих применяемых на этапах ТПП методов не позволяет, однако, решить все задачи. CBR в основном применяется для подбора начальных параметров, тогда как методы, базирующиеся на экспертных системах, успешно используются для устранения качественных дефектов. Методы подбора данных и оптимизации широко применяются для определения оптимальных параметров процесса и оценки качества продукта. Полный процесс ТПП состоит из анализа полимерного изделия на технологичность, проектирования отливки и литейной формы, а также начальной настройки параметров процесса, качественной коррекции дефектов и количественной оптимизации параметров. Таким образом, должна быть создана гибридная интеллектуальная система, охватывающая все эти аспекты.

Предлагаемая схема гибридной системы ТПП на базе CBR-подхода для литья под давлением полимерных изделий показана на рисунке. После приема заказа в первую очередь проводится анализ технологичности полимерного изделия и оценивается возможность его изготовления методом литья под давлением. Далее осуществляется распознавание КТЭ и формируется запрос, который содержит все параметры полимерного изделия, необходимые для поиска аналогов в базе прецедентов (CBR-модуль) и дальнейшего проектирования отливки и подбора режимов литья. База знаний системы используется для поддержки процесса адаптации, когда некоторые параметры выбранного прецедента необходимо изменить или модифицировать, чтобы решить текущую задачу. Этот модуль содержит обобщенные знания, отражающие опыт эксперта в предметной области, такие как правила проектирования литниковой системы, правила проектирования системы охлаждения и т.д. Далее с учетом параметров новой литниковой системы оптимизируются режимы литья с использованием одного из описанных выше методов.



Предлагаемая схема позволит ускорить процесс технологической подготовки производства полимерных изделий за счет быстрого поиска аналогов, высокой автоматизации подбора параметров литниковой системы и режимов литья.

Проведенный анализ современных интеллектуальных методов, используемых в САПР ТП, и методов ТПП полимерных изделий методом литья под давлением позволяет сделать следующие выводы:

— к современным приборам предъявляются высокие требования по качеству и надежности, что обуславливает необходимость применения конструкторами новых материалов и

их сочетаний при проектировании новых изделий, а также разработки технологами новых методов или усовершенствования существующих технологий переработки материалов;

— в области приборостроения наблюдается возрастающий интерес к выпуску продукции, обладающей высокой степенью кастомизации;

— анализ открытых литературных источников показал рост использования термопластичных полимерных материалов во многих областях промышленности, однако вопросы автоматизации технологической подготовки их производства не нашли оптимального решения;

— исследования в области переработки термопластичных полимерных материалов в настоящее время разрознены и бессистемны, отсутствуют единые методологические подходы, систематизирующая база данных, которая позволила бы сопоставить качество выпускаемой продукции и технологические параметры ее изготовления;

— необходима разработка основанной на интеллектуальных подходах методики организации технологической подготовки производства изделий из термопластичных полимерных материалов в условиях цифрового производства, позволяющей сократить ее длительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourne D. A., Corney J. R., Gupta S. K. Recent Advances and Future Challenges in Automated Manufacturing Planning // J. Computing Inform. Sci. Eng. 2011. Vol. 11.
2. Statista (2021). Annual Production of Plastics Worldwide from 1950 to 2020 [Электронный ресурс]: <[https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since->](https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-).
3. Al-wswasi M., Ivanov A., Makatsoris H. A survey on smart automated computer-aided process planning (ACAPP) techniques // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. P. 809—832.
4. Shi Y., Zhang Y., Xia K., Hari R. F. A Critical Review of Feature Recognition Techniques // Computer-Aided Design and Applications. 2020. Vol. 17. P. 861—899.
5. Babic B. R., Ne'sic N., Miljkovic Z. Automatic feature recognition using artificial neural networks to integrate design and manufacturing: review of automatic feature recognition systems // Artif. Intelligence Eng. Design, Anal. Manuf. 2011. Vol. 25(03). P. 289—304. DOI: 10.1017/S0890060410000545.
6. Ahn H. K., Berg M., Bose P., Cheng S.W., Halperin D., Matous'ek J., Schwarzkopf O. Separating an Object From Its Cast // CAD. 2002. Vol. 34(8). P. 547—559.
7. Elber G., Chen X., Cohen E. Mold Accessibility via Gauss Map Analysis // ASME J. Computing Inform. Sci. Eng. 2005. Vol. 5(2). P. 79—85.
8. Priyadarshi A. K., Gupta S. K. Finding Mold-Piece Regions Using Computer Graphics Hardware // Geometric Modeling and Processing. Lecture Notes in Computer Science. 2006. Vol. 4077. P. 655—662.
9. Zhu J., Kato M., Tanaka T., Yoshioka H., Saito Y. Graph based automatic process planning system for multi-tasking machine // J. Adv. Mech. Design Syst. 2015. Vol. 9.
10. Gao X., Mou W., Peng Y. An intelligent process planning method based on feature-based history machining data for aircraft structural parts // Procedia CIRP. 2016. Vol. 56. P. 585—589.
11. Zehetban L., Roller D. Automated rule-based system for opitz feature recognition and code generation from STEP // Computer-Aided Design and Applications. 2016. Vol. 13. P. 309—319.
12. Xia Q., Etienne A., Dantan J.-y., Siadat A. Reconfigurable machining process planning for part variety in new manufacturing paradigms: Definitions, models and framework // Comput. Ind. Eng. 2018. Vol. 115. P. 206—219.
13. Yang D., Danai K., Kazmer D. A knowledge-based tuning method for injection molding machines // J. of Manufacturing Science and Engineering. 2000. Vol. 123(4). P. 682—691.
14. Choudhary A. K., Harding J. A., Tiwari M. K. Data mining in manufacturing: A review based on the kind of knowledge // J. of Intelligent Manufacturing. 2009. Vol. 20. P. 501—521.
15. Li J.-R., Khoo L. P., Tor S. B. RMINE: A rough set based data mining prototype for the reasoning of incomplete data in condition-based fault diagnosis // J. of Intelligent Manufacturing. 2006. Vol. 17. P. 163—176.

16. *Montgomery D. C.* Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 2012. 752 p.
17. Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Васильков С. Д., Андреев Ю. С., Демкович Н. А. Разработка и моделирование технологических процессов производства полимерных оптических изделий в распределенной интегрированной среде // Оптический журн. 2017. Т. 84, № 1. С. 85—92.
18. *Yadav R., Joshi S., Kamble N.* Recent methods for optimization of plastic injectionmolding process—A literature review // Intern. Journal of Scientific and Engineering Research. 2012. Vol. 3. P. 1—8.
19. *Gao H., Zhang Y., Zhou X., Li D.* Intelligent methods for the process parameter determination of plastic injection molding // Frontiers of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 13. P. 85—95.
20. *Khosravani M. R., Nasiri S.* Injectionmolding manufacturing process: review of case-based reasoning applications // J. of Intelligent Manufacturing. 2020. Vol. 31. P.847—864.
21. *Kwong C. K., Smith G. F.* A computational system for process design of injection moulding: Combining blackboard-based expert system and case-based reasoning approach // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1998. Vol. 14(4). P. 239—246.
22. *Mok S. L., Kwong C. K.* Application of artificial neural network and fuzzy logic in a case-based system for initial process parameter setting of injection molding // J. of Intelligent Manufacturing. 2002. Vol. 13(3). P.165—176.
23. *Zhou H. M., Zhao P., Feng W.* An integrated intelligent system for injection molding process determination // Advances in Polymer Technology. 2007. Vol. 26(3). P. 191—205.
24. *Dhaliwal J. S., Benbasat I.* The use and effects of knowledge-based system explanations: Theoretical foundations and a framework for empirical evaluation // Information Systems Research. 1996. Vol. 7(3). P. 342—362.
25. *Liao S.H.* Expert system methodologies and applications — A decade review from 1995 to 2004 // Expert Systems with Applications. 2005. Vol. 28(1). P. 93—103.
26. *Chen W. C., Nguyen M. H., Chiu W. H.* et al. Optimization of the plastic injection molding process using the Taguchi method, RSM, and hybrid GA-PSO // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 83(9—12). P. 1873—1886.
27. *Zhao J., Cheng G.* An innovative surrogate-based searching method for reducing warpage and cycle time in injection molding // Advances in Polymer Technology. 2015. Vol. 35(3). P. 288—297.
28. *Ozcelik B., Erzurumlu T.* Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm // Materials Process Technol. 2006. Vol. 171(3). P. 437—445.
29. *Farshi B., Gheshmi S., Miandoabchi E.* Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm // Materials and Design. 2011. Vol. 32(1). P. 414—423.
30. *Mathivanan D., Parthasarathy N. S.* Sink-mark minimization in injection molding through response surface regression modeling and genetic algorithm // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 45(45). P. 867—874.
31. *Shi H. C., Xie S. M., Wang X. C.* A warpage optimization method for injection molding using artificial neural network with parametric sampling evaluation strategy // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 65. P. 343—353.
32. *Shie J. R.* Optimization of injection molding process for contour distortions of polypropylene composite components by a radial basis neural network // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 36. P. 1091—1103.
33. *Gang X., Yang Z. T., Long G. D.* Multi-objective optimization of MIMO plastic injection molding process conditions based on particle swarm optimization // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 58. P. 521—531.
34. *Gang X., Yang Z. T.* Multi-objective optimization of process parameters for plastic injection molding via soft computing and grey correlation analysis // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 78. P. 525—536.
35. *Low M., Lee K.* A Parametric-Controlled Cavity Layout Design System for a Plastic Injection Mould // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2003. Vol. 21. P. 807—819. DOI: 10.1007/s00170-002-1397-9

Сведения об авторах

- Артёмий Валерьевич Чукичев** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: avchukichev@itmo.ru
- Ольга Сергеевна Тимофеева** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: olga2957869@mail.ru
- Юрий Сергеевич Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: ysandreev@itmo.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 05.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

- Bourne D.A., Corney J.R., Gupta S.K. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, 2011, vol. 11.
- Statista, Annual Production of Plastics Worldwide from 1950 to 2020, 2021, <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950>.
- Al-wswasi M., Ivanov A., Makatsoris H. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 97, pp. 809–832.
- Shi Y., Zhang Y., Xia K., Hari R.F. *Computer-Aided Design and Applications*, 2020, vol. 17, pp. 861–899.
- Babic B.R., Ne'sic N., Miljkovic Z. *Artif. Intell. Eng. Des., Anal. Manuf.*, 2011, no. 03(25), pp. 289–304, DOI: 10.1017/S0890060410000545.
- Ahn H.K., Berg M., Bose P., Cheng S.W., Halperin D., Matous'ek J., Schwarzkopf O. *CAD*, 2002, no. 8(34), pp. 547–559.
- Elber G., Chen X., Cohen E. *ASME J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, 2005, no. 2(5), pp. 79–85.
- Priyadarshi A.K., Gupta S.K. *Geometric Modeling and Processing, Lecture Notes in Computer Science*, 2006, vol. 4077, pp. 655–662.
- Zhu J., Kato M., Tanaka T., Yoshioka H., Saito Y. *J. Adv. Mech. Des. Syst.*, 2015, vol. 9.
- Gao X., Mou W., Peng Y. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 56, pp. 585–589.
- Zehtaban L., Roller D. *Computer-Aided Design and Applications*, 2016, vol. 13, pp. 309–319.
- Xia Q., Etienne A., Dantan J.-y., Siadat A. *Comput. Ind. Eng.*, 2018, vol. 115, pp. 206–219.
- Yang D., Danai K., Kazmer D. J. *of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, no. 4(123), pp. 682–691.
- Choudhary A.K., Harding J.A., Tiwari M.K. *J. of Intelligent Manufacturing*, 2009, vol. 20, pp. 501–521.
- Li J.-R., Khoo L.P., Tor S.B. *J. of Intelligent Manufacturing*, 2006, vol. 17, pp. 163–176.
- Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. John Wiley & Sons, 2012, 752 p.
- Yablochnikov E.I., Pirogov A.V., Vasil'kov S.D., Andreev Y.S., Demkovich N.A. *J. of Optical Technology*, 2017, no. 1(84), pp. 62–67.
- Yadav R., Joshi S., Kamble N. *Intern. J. of Scientific and Engineering Research*, 2012, vol. 3, pp. 1–8.
- Gao H., Zhang Y., Zhou X., Li D. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 13, pp. 85–95.
- Khosravani M.R., Nasiri S. *J. of Intelligent Manufacturing*, 2020, vol. 31, pp. 847–864.
- Kwong C.K., Smith G.F. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1998, no. 4(14), pp. 239–246.
- Mok S.L., Kwong C.K. *J. of Intelligent Manufacturing*, 2002, no. 3(13), pp. 165–176.
- Zhou H.M., Zhao P., Feng W. *Advances in Polymer Technology*, 2007, no. 3(26), pp. 191–205.
- Dhaliwal J.S., Benbasat I. *Information Systems Research*, 1996, no. 3(7), pp. 342–362.
- Liao S.H. *Expert Systems with Applications*, 2005, no. 1(28), pp. 93–103.
- Chen W.C., Nguyen M.H., Chiu W.H. et al. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, no. 9–12(83), pp. 1873–1886.
- Zhao J., Cheng G. *Advances in Polymer Technology*, 2015, no. 3(35), pp. 288–297.
- Ozcelik B., Erzurumlu T. *Mater. Process Technol.*, 2006, no. 3(171), pp. 437–445.
- Farshi B., Gheshmi S., Miandoabchi E. *Mater. Des.*, 2011, no. 1(32), pp. 414–423.
- Mathivanan D., Parthasarathy N.S. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, no. 45(45), pp. 867–874.
- Shi H.C., Xie S.M., Wang X.C. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013, vol. 65, pp. 343–353.
- Shie J.R. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2008, vol. 36, pp. 1091–1103.
- Gang X., Yang Z.T., Long G.D. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 58, pp. 521–531.
- Gang X., Yang Z.T. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, vol. 78, pp. 525–536.
- Low M., Lee K. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2003, vol. 21, pp. 807–819, DOI: 10.1007/s00170-002-1397-9.

Data on authors

- Artemiy V. Chukichev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: avchukichev@itmo.ru
- Olga S. Timofeeva** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: olga2957869@mail.ru
- Yuriy S. Andreev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ysandreev@itmo.ru

Received 22.08.2022; approved after reviewing 05.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.

**A RETROSPECTIVE STUDY
OF THE BENEFITS OF THE “CPS ENGINEERING” COURSES
FOR CURRENT GRADUATE CAREERS**

E. MÄKIÖ¹, J. MÄKIÖ², K. V. KIPRIANOV³, V. A. ARCKHIPOV^{3*}

¹ University of Warwick, Coventry, England

² University of Applied Sciences Emden / Leer, Emden, Germany

³ ITMO University, St. Petersburg, Russia

*arc.valery@gmail.com

Abstract. Well-trained engineers are needed to plan, design, develop and maintain cyber physical systems (CPS) that form the core of modern digitized industrial infrastructures. The development of such systems is challenging, however, according to industry representatives, the graduates are not adequately prepared for professional practice. In particular, there is a lack of transferable skills. To be employable and successful in their careers, students must have the opportunity to gain experience developing such systems during their studies and practice both technical and transferable skills in realistic environments. This paper aims to provide a retrospective view of the outcomes of two courses in industrial CPS engineering within the master’s program at ITMO University, St. Petersburg, Russia, conducted in the winter semesters of 2016/17 and 2017/18. For this purpose, graduates who participated in these courses were interviewed in 2022. The respondents reflected on the benefits of these courses for their work. The graduates reported that participation was highly relevant to both their professional and personal development. They indicated that they especially valued programming skills and collaboration and communication skills that they acquired in the courses.

Keywords: industrial cyber physical systems, education, T-CHAT educational approach, qualitative study

For citation: Mäkiö E., Mäkiö J., Kipriianov K. V., Arckhipov V. A. A Retrospective Study of the Benefits of The “CPS Engineering” Courses for Current Graduate Careers // *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 25—33 (in English). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-25-33.

**ПРЕИМУЩЕСТВА КУРСОВ ПО СОЗДАНИЮ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ДЛЯ ТЕКУЩЕЙ КАРЬЕРЫ ВЫПУСКНИКОВ:
РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

Е. Макио¹, Ю. Макио², К. В. Киприянов³, В. А. Архипов^{3*}

¹Уорикский университет, Ковентри, Великобритания

²Университет прикладных наук Эмден/Леер, Эмден, Германия

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

arc.valery@gmail.com

Аннотация. Для планирования, проектирования, разработки и обслуживания киберфизических систем, которые составляют основу современных цифровых промышленных инфраструктур, необходимы хорошо обученные инженеры. Разработка таких систем является сложной задачей, однако, по словам представителей отрасли, выпускники недостаточно подготовлены к профессиональной работе, в частности, не хватает практических навыков. Для последующего трудоустройства и успешной карьеры студенты должны иметь возможность получить опыт по созданию таких систем во время учебы и отработать как технические, так и практические навыки в реальных условиях. В статье представлен ретроспективный обзор результатов на примере двух курсов по проектированию промышленных киберфизических систем в рамках магистерской программы Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, проведенных в зимних семестрах 2016/17 и 2017/18 гг. С этой целью в 2022 г. были опрошены выпускники, прошедшие эти курсы, им предлагалось оценить пользу курсов для своей работы. По словам выпускников, участие в этих курсах имело большое значение как для их профессионального, так и личного развития; также они отметили, что особенно ценят приобретенные на курсах навыки программирования и совместной работы.

Ключевые слова: промышленные киберфизические системы, образование, целостный образовательный подход T-CHAT, качественное исследование

Ссылка для цитирования: Макио Е., Макио Ю., Киприянов К. В., Архипов В. А. Преимущества курсов по созданию киберфизических систем для текущей карьеры выпускников: ретроспективное исследование // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2023. Т. 66, № 1. С. 25—33. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-25-33.

Introduction. Cyber Physical Systems (CPS) consist of components that have a physical and a virtual part. Physical parts are real physical objects such as sensors, actuators and machine tools or combinations of them. The virtual part is the software that serves as a cyber image of the physical objects. In combination with Internet of Things, CPS build up the core elements of Industry 4.0 concept [1], and of the Industrial Cyber Physical Systems (ICPS) [2] — the core of real-world digitalized and networked industrial infrastructures.

Well-trained engineers from various disciplines are needed for the planning, construction, operation and maintenance of such industrial infrastructures. Due to the interdisciplinary nature of ICPS engineering, sound technical skills are not enough [3—5]. As interdisciplinary teams develop ICPS, technical skills combined with strong transferable skills, which include, e.g. skills in effective communication and collaboration, problem-solving, innovation and the ability to engage in lifelong learning are required to work effectively and efficiently. In addition, technical skills from various fields such as electrical engineering, mechanical engineering, computer science, networking, analytics, and physics are required.

The ICPS engineering is a new discipline and there is a lack of professional ICPS engineers in the industry. These engineers, in turn, often lack the technical and transferable skills expected by industry [3, 6]. Two main issues have been found by review of the literature on ICPS engineering education [2, 3]: 1) social competences and attitudes are not sufficiently addressed by CPS curricula and courses, and 2) the methodology used in CPS curricula and courses is restricted.

The task-centric holistic agile teaching approach T-CHAT [7, 8] is developed to address these issues. It proposes a combination of pedagogical approaches and teaching methods to improve both the technical and transferable skills of students. The T-CHAT combines five pedagogical approaches 1) perceptive learning, 2) project-based learning (PjBL), 3) problem-based learning (PBL), 4) research-based learning (RBL), and 5) face-to-face teaching (F2F).

The T-CHAT approach was originally developed to teach ICPS engineering in joint courses at ITMO University, St. Petersburg, Russia, and University of Applied Sciences Emden/Leer, Germany [9]. These courses, which addressed aspects of real-life ICPS projects and were thematically linked, took place in the winter semesters 2016/2017 and 2017/2018. The main goal of these courses was that students sustainably attain the technical knowledge and soft skills to use in their future profession. In 2022, 4 to 5 years after these courses, we aim to explore the following research question:

RQ How do graduates perceive the benefits of taking courses taught using the T-CHAT educational approach to their current careers?

Background. The ICPS engineering is an interdisciplinary discipline that requires interdisciplinary practice-based education. In interdisciplinary learning, “learners integrate information, data, techniques, tools, perspectives, concepts, and/or theories from two or more disciplines to craft products, explain phenomena, or solve problems, in ways that would have been unlikely through single-disciplinary means” [10]. Therefore, the use of teaching methods that support interdisciplinary learning is a natural choice for teaching ICPS engineering.

Master’s Program “Industrial CPS”. Master’s program “Industrial CPS” at ITMO University served as a container for two joint “ICPS engineering” courses (for details of the program see [11]). This program offers an integrated set of basic and optional courses to teach ICPS/Industry 4.0 concepts and to create the basis for independent student research. The outcomes of this program cover three main areas: 1) personal competencies, 2) soft skills, and 3) basic professional skills.

Students who attend this program and courses have heterogeneous professional backgrounds. This heterogeneity must be taken into account in the classroom. The teachers’ task is to consolidate students in a learning community and give them the responsibility for learning.

To achieve the educational goals, new innovative teaching concepts are required that focus on the teaching of both technical and transferable skills. The T-CHAT educational approach addresses the development of the required skills.

T-CHAT Educational Approach. The T-CHAT educational approach combines five pedagogical approaches to support the development of students’ technical and transferable skills in the T-CHAT learning process [7]. In this learning process, students are first given an intuitive understanding of the subject matter by giving discipline-typical examples, tasks, and observations from everyday life (for perceptual learning approach see [12]). This intuitive understanding is further conceptualized by means of induction into theoretical knowledge. The conceptualization may be reached, for example, by presentations held by teacher during lectures or by PBL activities during labs. The perceptual learning approach is to be used intensively for the threshold concepts of the subject matter, i.e. for the topics in the material that have a central conceptual role and in which a large number of students often have difficulties.

F2F-teaching is conducted to teach main concepts and ideas. In order to achieve a trusting atmosphere in the lectures, it is recommended to encourage the active participation of students and to involve them in discussions. Activation of students can be achieved through mixing short conceptual and theoretical presentations with the phases of individual and group work. For example, students can solve a short 5-minute task and the results are immediately discussed in the plenum.

It is important to find out at the end of each lecture, which topics students have understood, and which topics remained unclear. This can be done by short anonymous feedback in paper form or electronically. The correctness of the students’ answers can be checked e.g. by control multiple-choice questions on the material taught in the lecture. Student feedback is used to flexibly adapt the learning process to the students’ understanding and progress. The open points raised by the students are discussed at the beginning of the next lecture.

During labs, the PBL approach can be applied by giving students problems as individual or group tasks. It is recommended to set the tasks so that they are started during the labs and completed as homework individually or in groups.

It is recommended to start with PjBL after students have acquired some background knowledge and skills in the subject matter. To avoid free riders and social conflicts during the project work, small groups of maximum four persons are recommended. Students can organize their groups themselves. Some instructions may be needed before starting work.

Appropriate tasks can be set on the use of RBL. These tasks may be on topics whose mastery is fundamental for a deep understanding of the topic and which are so complex that some research is required.

Experiment. “CPS Engineering” Courses. Two “ICPS engineering” courses were implemented using the T-CHAT educational approach. German students studying computer science and Russian students studying instrumentation and control engineering took part in these courses, which were supervised by German and Russian tutors.

The learning outcomes of two joint “ICPS engineering” courses were similar to the intended outcomes specified in the Master’s program “Industrial CPS” at ITMO University (for details of the program see [11]).

In the first course, the students needed to design, develop and validate a CPS that emulates a small factory with several robots transporting building blocks from a source palette to a goal palette while cleaning and painting them (for details see [8]). Solving this task was carried out as a project running in an environment, in which the tutors functioned as customers ordering a CPS from a “manufacturer”, in this case the students. The students were responsible for setting up a technical infrastructure for CPS development, project management and communication, forming project teams, and organizing the project work. The course was planned and implemented using the methodology of T-CHAT [8]. The main objectives were to facilitate effective communication and collaboration, as they are crucial for the project success in technology-intensive projects within in globally distributed developments [13].

In the second course, the scenario of the first course was extended to include ERP and procurement requirements. The structure of the two courses was similar and is shown in Fig. 1.

Theme/Method \ Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Opening workshop															
Distributed Software development															
Closing workshop															
Perceptual teaching															
Face-2-Face teaching															
Project based teaching															
Problem based teaching															
Research oriented teaching															

Fig. 1

Interviews with Graduates. A qualitative study was conducted to answer the research question. Structured interviews were carried out with six volunteer graduates of ITMO University who had participated in the “CPS engineering” courses (for questions see Appendix Structured interviews with students). First, personal information such as degree obtained, and work experience was collected. Then, interviewees were asked to look back at the courses they had attended in 2016/17 and 2017/18 from two perspectives: 1) back in 2016-2018 and 2) now, after they had gained some work experience. The interview questions aimed to explore how the graduates perceived the development of their professional, personal and soft skills. Fig. 2 schematically illustrates the intention and structure of the interviews.

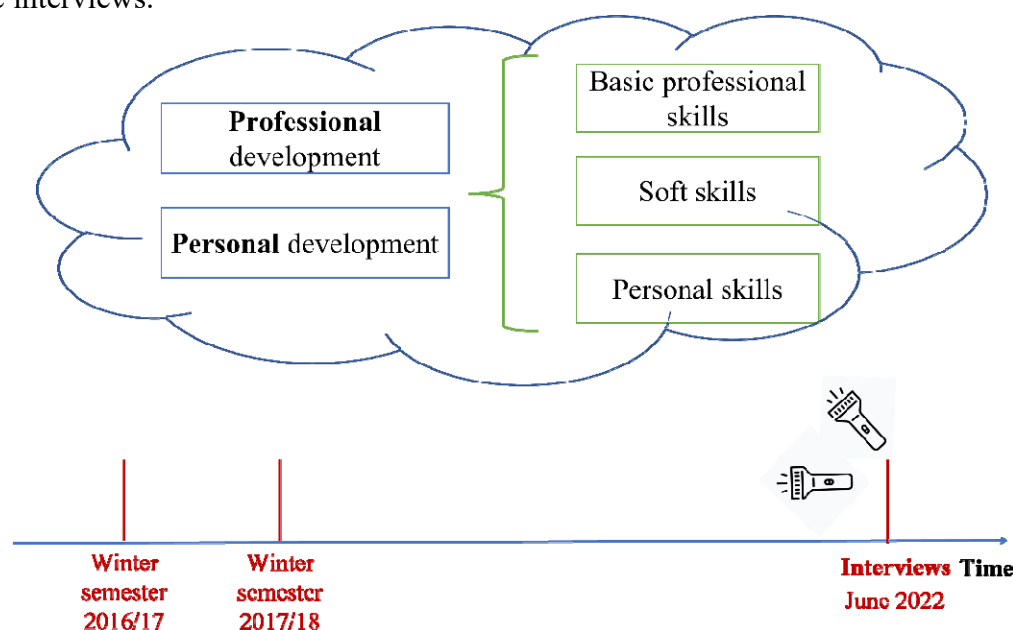


Fig. 2

The interviews were recorded, transcribed, and coded. The categories and themes were identified mainly based on the structure of the interviews. Based on these categories and topics, the responses were analysed to examine the perceptions of the students participating in the course about the usefulness of this course for their professional and personal development, thus answering the research question. Based on this analysis, qualitative explanations and generalizations were developed that remain close to concrete data and contexts, but go beyond simple summary descriptions of the data [14].

Results. All six interviewees were male graduates of ITMO University’s “Computer science and engineering” program. Table 1 shows the graduates’ data on their degrees and work experience in the profession. One interviewee did not work in his profession after graduation.

Table 1

Interviewee	Degree	Work experience in the profession
Interviewee 1 (I1)	Master	2.5 years
Interviewee 2 (I2)	Master	1 year
Interviewee 3 (I3)	Bachelor (in 2017)	5 years
Interviewee 4 (I4)	Master (in 2019)	No experience
Interviewee 5 (I5)	Bachelor (2017)	7 years
Interviewee 6 (I6)	Master	3 years

Two categories and four associated themes were identified for each category based on the structure of the interview questions (see Fig. 3) and are used as a framework for summarizing students’ perceptions.

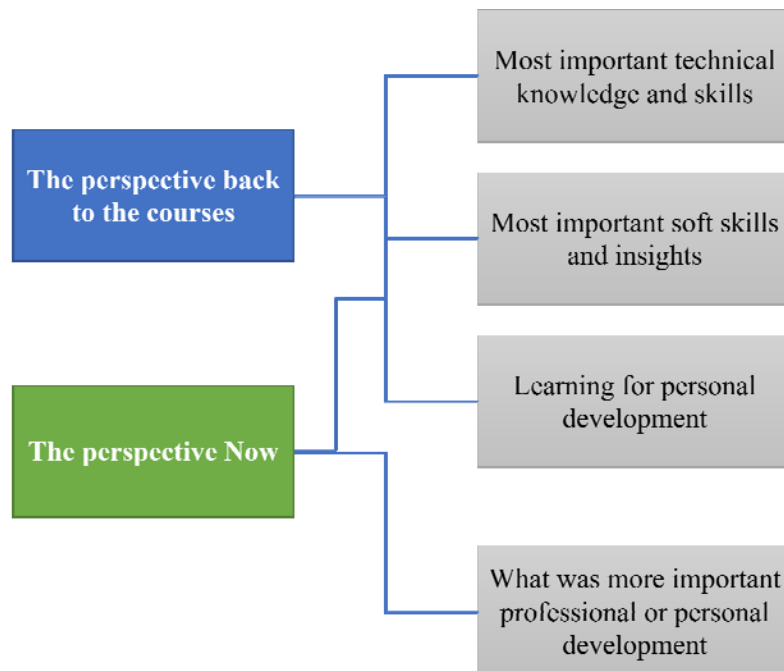


Fig. 3

Table 2 lists the identified codes within both categories “Back to the course” and “Now” and maps them to the interviewees.

Table 2

Theme	Categories			
	The perspective back to the courses		The perspective Now	
	Codes	Inter-viewee	Codes	Inter-viewee
Most important technical knowledge and skills	The use of various programming environments and tools	I1, I2, I3	The use of various programming tools and libraries	I1, I2
	Learning new programming languages. Programming skills	I2, I6	Programming skills	I6
			The ability to understand technical documentation	I2
	Algorithms, data structures, databases	I3, I5	Basic knowledge of network and internet applications	I4
	Technology for parts processing	I3	Technological skills	I6
			Industrial plants	I6

Continuation of Table 2

Theme	Categories			
	The perspective back to the courses		The perspective Now	
	Codes	Inter-viewee	Codes	Inter-viewee
Most important soft skills and insights	Teamwork	I1, I2, I4, I5, I6	Teamwork	I1, I2, I4
	Negotiating in team, finding a consensus, and searching for compromises	I2, I4	Negotiating as a team to reach a common consensus and a suitable solution. Finding compromises	I1, I2
	Communication	I3	Professional and constructive communication in team	I1, I6
	Project management and work coordination	I5, I6	Methodology for project management (SCRUM)	I5
	Presentation of project results	I6	Presentation and writing reports	I6
	Leadership	I5		
	English language	I6	English language	I6
	The ability and courage to express my disagreement with the other team members	I1		
	The ability to analyze information	I2	Analytical skills	I2
			Courage and curiosity to learn new things	I1
Learning for personal development	I identified the gaps in my technical skills	I1	The ability to express my disagreements with team solutions	I1
	I realized that I love teamwork and want to be a leader	I1		
	Communication with people of different age, from different professional backgrounds	I2, I6	Communication skills	I2
	The ability to actively listen to people	I5	Ability to achieve goals within a given time frame	I5
	Self-confidence	I6	A view on how other people learn and work, participate in project work. It was useful to understand that other people work differently	I6
What was more important — professional or personal development	Skills for my professional development were more important			I1, I2, I5
	Skills for both professional and personal development were important			I3, I4
	Skills for my personal development are more important, particularly self-confidence and confidence in my ability to work in projects			I6

The graduated students interviewed can recall the benefits with varying degrees of accuracy 4 to 6 years after taking the course. Two interviewees, I3 and I4, can barely recall the knowledge and skills they had acquired in the course. In particular, respondent I4 who did not work in his profession could not recall the course details. However, the remaining respondents described their experiences in detail and reflected on the benefits they derived both professionally and personally.

Half of the interviewees believed that skills they acquired were most important for their professional development, two respondents mentioned that skills were important for both professional and personal development, and only one respondent emphasized that skills he acquired for his personal development predominated.

Comparing the two different perspectives — “back to the course” and “now” — there are only insignificant differences in the responses of each graduate. Most of them cited almost the same benefits for both perspectives. However, some interviewees were a bit more thoughtful. Respondent I6,

for example, stated that he only perceived the benefits of the course much more deeply after he had started his professional work. It was only then that he realized the importance of the experiences he gained during the course, namely project experience and leadership skills, the insight that people work and learn differently, and the self-confidence gained. He uses the insights in his work as a team leader. I1 mentioned that during the course he recognized some gaps in his technical skills and that he worked a lot to fill those gaps after the course. I1 and I2 emphasized that they learned to negotiate as a team to find consensus and the best solution.

Regarding technical knowledge and skills, most interviewees cited the acquisition of programming skills and the use of various programming environments and tools as the most important then and now for their careers.

It is worth noting that the ability to work in team was mentioned as the most frequently acquired soft skill, followed by professional communication skills and negotiation ability. Some respondents cited analytical skills, courage and curiosity to learn new things, and leadership qualities as benefits of attending the course.

Conclusion. This paper retrospectively examines the benefits that university graduates have derived from their participation in "ICPS Engineering" courses for their post-graduation careers and work experience. These courses were taught using the T-CHAT holistic educational approach and addressed the development of both technical and transferable skills.

The analysis of qualitative data collected through structured interviews revealed that the graduates primarily use the technical skills in programming and programming tools and environments, and transferable skills such as collaboration and communication, especially negotiation strategies and team consensus building, acquired in these courses in their current careers. Some graduates also indicated that they valued analytical thinking skills and the acquired ability to independent learning of new topics. The graduates also reported benefits for their personal development, such as increased self-confidence. These results demonstrate the positive long-term effect of the learning experiences students have had in the courses taught using the T-CHAT educational approach.

APPENDIX. STRUCTURED INTERVIEWS WITH STUDENTS.

Some personal questions:

— What degree do you have?

— How long is your work experience in your profession after graduation?

If you look back at the module you completed, from the point of view of THEN:

1. From a professional point of view:

a. What technical knowledge and skills did you acquire? What was new for you? What was most important?

b. What soft skills did you acquire? What insights did you gain?

2. What skills did you learn back then for your personal development at that time?

If you look back at the module you completed, from TODAY'S point of view:

1. From a professional point of view:

a. What technical knowledge and skills you acquired back then do you value most today or is most useful for you today?

b. What soft skills you acquired back then do you value most in your current professional work? What insights have been most important for your professional work?

2. What skills you acquired back then have been most important for your personal development?

3. What has been for you more important: knowledge and skills that you acquired for your professional development or for your personal development?

REFERENCES

1. Gehrke L., Kühn A., Rule D., Moore P., Bellmann C., Siemes S., Dawood D., Lakshmi S., Kulik J., and Standley M. *VDI/ASME Industry 4.0 White Paper*, 2015, pp. 1–28.
2. Mäkiö-Marusik E. *Industrial Informatics (INDIN)*, 2017 *IEEE 15th Intern. Conf.*, 2017, pp. 518–525.
3. Mäkiö-Marusik E., Ahmad B., Harrison R., Mäkiö J., and Colombo A.W. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, pp. 491–496.
4. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, A 21st Century Cyber-Physical Systems Education. Washington DC: The National Academies Press, 2016. <https://doi.org/10.17226/23686>.
5. *National Academies of Sciences*, Interim Report on 21st Century Cyber-Physical Systems Education, Washington DC, The National Academies Press, 2015.
6. Radermacher A., Walia G., and Knudson D. *Companion Proceedings of the 36th international conference on software engineering*, ACM, 2014, pp. 291–300.
7. Mäkiö E., Azmat F., Ahmad B., Harrison R., and Colombo A.W. *European Journal of Engineering Education*, 2021, pp. 1–30.
8. Mäkiö J., Mäkiö-Marusik E., and Yablochnikov E. *Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, 2016, pp. 6608–6614.
9. Mäkiö-Marusik E., Mäkiö J., and Kowal J. *AMCIS 2017 Proc., Proc. of the Twenty-third Amer. Conf. on Information Systems, in Education, Curriculum, Education and Teaching Cases (SIGED)*, 2017, pp. 1–10.
10. Mansilla V.B. *The Oxford handbook of interdisciplinarity*, 2010, pp. 288–306.
11. Mäkiö E., Yablochnikov E., Colombo A.W., Mäkiö J., and Harrison R. *2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, 2020, pp. 359–364.
12. Kurki-Suonio K. *Science & Education*, 2011, vol. 20, pp. 211–243.
13. Bancino R. and Zevalink C. *Techniques: Connecting Education and Careers (JI)*, 2007, vol. 82, pp. 20–22.
14. Neuman W.L. *Basics of social research: Qualitative & Quantitative Approaches*, USA, Pearson Education Limited, 2014.

Data on authors

Elena Mäkiö	—	PhD; University of Warwick; Professor; E-mail: e.makio-marusik@warwick.ac.uk
Juho Mäkiö	—	PhD; University of Applied Sciences Emden / Leer; Professor; E-mail: juho.maekioe@hs-emden-leer.de
Kirill V. Kipriianov	—	ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: 142739@niuitmo.ru
Valery A. Archhipov	—	ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Lecturer; E-mail: arc.valery@gmail.com

Received 22.08.2022; approved after reviewing 09.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gehrke L., Kühn A., Rule D., Moore P., Bellmann C., Siemes S., Dawood D., Lakshmi S., Kulik J., and Standley M. A Discussion of Qualifications and Skills in the Factory of the Future: A German and American Perspective // *VDI/ASME Industry 4.0 White Paper*. 2015. P. 1–28.
2. Mäkiö-Marusik E. Current trends in teaching cyber physical systems engineering: A literature review // *15th Intern. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE, 2017. P. 518–525.
3. Mäkiö-Marusik E., Ahmad B., Harrison R., Mäkiö J., and Colombo A. W. Competences of cyber physical systems engineers—Survey results // *Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. IEEE, 2018. P. 491–496.
4. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. A 21st Century Cyber-Physical Systems Education. Washington DC: The National Academies Press, 2016. <https://doi.org/10.17226/23686>.
5. National Academies of Sciences. Interim Report on 21st Century Cyber-Physical Systems Education. Washington DC: The National Academies Press, 2015.
6. Radermacher A., Walia G., and Knudson D. Investigating the skill gap between graduating students and industry expectations // *Companion Proc. of the 36th Intern. Conf. on Software Engineering*. ACM, 2014. P. 291–300.
7. Mäkiö E., Azmat F., Ahmad B., Harrison R., and Colombo A.W. T-CHAT educational framework for teaching cyber-

- physical system engineering // European Journal of Engineering Education. 2021. P. 1—30.
8. *Mäkiö J., Mäkiö-Marusik E., and Yablochnikov E.* Task-centric holistic agile approach on teaching cyber physical systems engineering // Industrial Electronics Society, IECON 2016. 42nd Annual Conf. of the IEEE. IEEE, 2016. P. 6608—6614.
 9. *Mäkiö-Marusik E., Mäkiö J., and Kowal J.* Implementation of Task-Centric Holistic Agile Approach on Teaching Cyber Physical Systems Engineering // AMCIS 2017. Proc. of the 23rd Amer. Conf. on Information Systems in Education, Curriculum, Education and Teaching Cases (SIGED). 2017. P. 1—10.
 10. *Mansilla V. B.* Learning to synthesize: The development of interdisciplinary understanding // The Oxford handbook of interdisciplinarity. 2010. P. 288—306.
 11. *Mäkiö E., Yablochnikov E., Colombo A. W., Mäkiö J., and Harrison R.* Applying Task-centric Holistic Teaching Approach in Education of Industrial Cyber Physical Systems // Conf. on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS). IEEE, 2020. P. 359—364.
 12. *Kurki-Suonio K.* Principles supporting the perceptive teaching of physics: A “practical teaching philosophy?” // Science & Education. 2011. Vol. 20. P. 211—243.
 13. *Bancino R. and Zevalkink C.* Soft Skills: The New Curriculum for Hard-Core Technical Professionals // Techniques: Connecting Education and Careers. 2007. Vol. 82. P. 20—22.
 14. *Neuman W. L.* Basics of social research: Qualitative & Quantitative Approaches. USA: Pearson Education Limited, 2014.

Сведения об авторах**Елена Макио**— Д-р философии; Убрикский университет; профессор;
E-mail: e.makio-marusik@warwick.ac.uk**Юхо Макио**

— Д-р философии; Университет прикладных наук Эмден/Леер; профессор; E-mail: juho.maekioe@hs-empden-leer.de

Кирилл Васильевич Киприянов

— Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: 142739@niuitmo.ru

Валерий Александрович Архипов

— Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; преподаватель; E-mail: arc.valery@gmail.com

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 09.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

**МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ АГЕНТОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АДАПТЕРОВ**О. А. АБЫШЕВ^{1*}, У. М. ДЫЙКАНБАЕВА², У. К. ОМУРАЛИЕВ²¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*abyшев.o@yandex.ru

² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Киргизия

Аннотация. Предложена методика построения промышленных агентов с применением технологических адаптеров для интеграции физических объектов к производственной киберфизической системе. Рассмотрены возможности применения и реализации подключения объекта на примере муфельной электропечи. Произведен анализ текущего состояния исследуемого объекта и рассмотрен вариант состава комплектации технологического адаптера. Показан процесс построения промышленного агента — модульной ячейки „Melting Cell“, предоставляющей возможность проведения операций термообработки, плавления и спекания по запросу в качестве сервисного приложения экспериментальной Smart Factory.

Ключевые слова: технологический адаптер, автоматизация проектирования, дискретное производство, киберфизические системы, ICPS

Ссылка для цитирования: Абышев О. А., Дыйканбаева У. М., Омуралиев У. К. Методика построения промышленных агентов с применением технологических адаптеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 34—42. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-34-42.

**METHOD FOR CONSTRUCTING INDUSTRIAL AGENTS
USING TECHNOLOGICAL ADAPTERS**O. A. Abyshev^{1*}, U. M. Dyikanbaeva², U. K. Omuraliev²¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

*abyшев.o@yandex.ru

² I. Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyz Republic,

Abstract. A method for constructing industrial agents using technological adapters for integrating physical objects into a production cyber-physical system is proposed. The possibilities of using and implementing the connection of an object are considered using the example of a muffle electric furnace. An analysis of the current state of the object under study is carried out and a variant of the technological adapter composition is described. The process of building an industrial agent - a modular cell "Melting Cell" is shown. The agent provides the ability to perform the heat treatment, melting and sintering operations on demand as a service application of the experimental Smart Factory.

Keywords: technological adaptor, design process automation, discrete production, cyber-physical systems, ICPS

For citation: Abyshev O. A., Dyikanbaeva U. M., Omuraliev U. K. Method for constructing industrial agents using technological adapters. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 34—42 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-34-42.

Современные тенденции по внедрению цифровых технологий в процессы планирования, конструирования и изготовления продукции, а также управления производством определяют важную роль использования проектного метода как инструмента для успешной модернизации и оптимизации промышленных предприятий [1, 2].

Формируемые динамикой потребительских предпочтений изменения требований внешней среды обуславливают необходимость поиска новых средств и методов повышения конкурентоспособности предприятий на рынках. Такие свойства производственных систем, как

гибкость, скорость выполнения заказов, индивидуализация, неразрывно связаны с использованием современных производственных и информационных технологий [2—7].

Актуальна задача ускорения корпоративных процессов принятия решений, в том числе с учетом большого количества данных и взаимосвязанности между киберфизическими системами и людьми. Повышение качества и доступности информации, а также построение сквозных цифровых процессов на предприятии на всех этапах жизненного цикла „проектирование — изготовление — эксплуатация“ служат основой для быстрого принятия решений [2, 3]. Эффективное использование информации и управление ею, а также системная интеграция могут быть достигнуты только при условии, что указанные процессы обеспечивают управление и обмен данными по всей цепочке поставок и жизненного цикла продукции.

Модернизация существующих предприятий предполагает модернизацию значительной части текущего парка оборудования, которая была спроектирована и изготовлена в соответствии с требованиями иерархической модели организации производственных систем (ISA-95). Это, в свою очередь, требует переосмысления роли и места данного оборудования в концепции современного производства, в частности, определения необходимости разработки методики его интеграции в современные производственные киберфизические системы.

В контексте четвертой промышленной революции широко используется термин „умная фабрика“ (Smart Factory), однако общепринятого его определения на сегодняшний день не существует [8]. При этом объем публикаций по данной теме является подтверждением ее высокой привлекательности в академических и прикладных инженерных сообществах. Актуальность настоящей работы заключается в исследовании и совершенствовании методик подключения legacy-компонентов аппаратного и программного обеспечения для реализации концепции Smart Factory.

Цель настоящей статьи — разработка методики построения индустриального агента с использованием технологического адаптера на примере реализации подключения legacy-компонента к экспериментальной производственной киберфизической системе для повышения ее интероперабельности. В данном случае технологический адаптер выполняет функцию интерфейса для подключения, а legacy-компонент выступает в качестве основы для проектирования индустриального агента — модульной ячейки „Melting Cell“ как сервисного приложения экспериментальной Smart Factory.

В рамках данной статьи авторами рассматриваются следующие понятия.

Цифровое производство, или цифровая фабрика (Digital Factory) — гибкое переналаживаемое программно-управляемое производство, функционирующее на основе единой модели данных об объектах (изделиях), процессах и производственной системе в единой виртуальной среде и реализующее свой жизненный цикл [5].

Производственная киберфизическая система (ПКФС — Industrial (Production) Cyber-Physical System) — в общем плане под киберфизической системой понимается сетевая техническая система, состоящая из взаимодействующих друг с другом цифровых (виртуальных) и физических систем (компонентов); ПКФС является приложением понятия „киберфизическая система для промышленного производства“ [3, 9—11].

Умное, интеллектуальное производство, или умная фабрика (Smart Factory) — способ организации производства, основанный на использовании гибкой, адаптивной архитектуры его построения на базе технологий производственных киберфизических систем [12].

Legacy-компонент — объект аппаратного или программного обеспечения производственной системы, интеграционные и функциональные возможности которого не отвечают требованиям для прямой интеграции и взаимодействия данного объекта с другими компонентами производственной системы. Legacy-компоненты требуют применения специальных устройств для их интеграции в среду производственной системы.

Индустриальный агент, или И4.0-агент (Industrial Agent, I4.0 Agent) — компонент, представляющий физический или логический объект системы, обладающий способностью к взаимодействию с другими агентами для достижения своей цели, если он не способен достичь цели самостоятельно; может выступать в качестве оборудования, робота, продукта, ячейки, инструмента или человека [11, 13]. Индустриальные агенты инкапсулируют соответствующие операции и процедуры в открытой и свободно распространяемой среде, понижая степень гетерогенности программного и аппаратного обеспечения, расширяя при этом традиционный подход, ограничивающий гибкость и способность к реконфигурации производственной системы.

Сервис-ориентированный подход — подход к проектированию, основанный на представлении проекта в виде совокупности сервисов, каждый из которых является отдельным компонентом с фиксированными интерфейсами, выполняющими определенные функции. Архитектурные модели дискретных производственных систем, реализующих сервис-ориентированный подход к проектированию, предложены, например, в [13—15]. Сервис-ориентированная архитектурная модель производственной системы предлагает единую схему взаимодействия сервисов, что обеспечивает гибкость моделей и позволяет принимать своевременные управленческие решения. Одной из важнейших задач проектирования индустриальных агентов является их интеграция с сервис-ориентированной архитектурой.

Технологический адаптер — необходимый компонент для обеспечения интеграции отдельных компонентов, не имеющих собственных стандартизированных модулей для подключения к производственной системе. Технологический адаптер может применяться как для интеграции сторонних решений, так и в качестве интерфейса подключения legacy-компонентов аппаратного и программного обеспечения. Функция технологического адаптера заключается в преобразовании форматов и структуры данных legacy-компонентов для последующего подключения к стандартизированным интерфейсам индустриальной киберфизической системы. При этом синтезированный таким образом индустриальный агент, состоящий из legacy-компонентов и технологического адаптера, способен к реализации своей функции в рамках сервис-ориентированной архитектуры исследуемой производственной системы.

В зависимости от назначения выделяют три варианта технологических адаптеров [11]: 1) адаптеры для подключения одной устаревшей системы к другой, 2) адаптеры для устаревших систем, работающих в режиме реального времени и 3) адаптеры для устаревших человеко-машинных интерфейсов. Эти виды технологических адаптеров предназначены для бесшовной интеграции отдельных систем и компонентов посредством стандартизированных интерфейсов к сервисной шине предприятия (middleware). Требование по обеспечению работы в режиме реального времени является наиболее критичным, в частности в вопросах оперативного реагирования на изменения в технологическом процессе, такие как изменение режимов обработки или быстрой переналадки оборудования.

Методика построения индустриальных агентов является составной частью разрабатываемой методики автоматизированного проектирования производственных киберфизических систем. Теоретическая основа методики — аппарат теории принятия решений, теории множеств, теории графов и системной инженерии.

Процесс проектирования, заложенный в основу предлагаемой методики, строится таким образом, что на каждом его этапе формируется соответствующее проектное описание, увеличивающее объем информации. При этом процесс проектирования представляется в виде последовательности циклов (итераций) проектных операций на каждом уровне разработки проекта, характеризующихся степенью детализации объекта проектирования и его элементов.

Предлагаемая методика состоит из следующих этапов.

1. Анализ текущего состояния физического объекта и оценка его готовности к построению индустриального агента.

2. Определение граничных условий процесса проектирования индустриального агента.
3. Синтез множества альтернатив проектных решений.
4. Выбор и принятие проектного решения.
5. Анализ принятого проектного решения.
6. Разработка прототипа индустриального агента.
7. Функциональное тестирование прототипа.

Рассмотрим практические аспекты реализации предлагаемой методики проектирования индустриальных агентов с применением технологических адаптеров для подключения технологического оборудования. Исследуемая производственная киберфизическая система является экспериментальным полигоном для моделирования, симуляции и прототипирования объектов и технологий в рамках производственного процесса изготовления магнитных композиционных материалов на базе производственных лабораторий при поддержке Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (Бишкек, Киргизия). Объектом служит технологическое оборудование, которое является компонентом аппаратного обеспечения экспериментальной производственной киберфизической системы. В качестве объекта подключения выбрана камерная муфельная электропечь СНОЛ – 1,6.2,00,8/9-М1 У4.2.

На начальном этапе были произведены оценка и анализ возможностей реализации текущей комплектации объекта как индустриального агента — модульной ячейки „Melting Cell“, предоставляющей возможность проведения операций термообработки, плавления и спекания по запросу в качестве сервисного приложения рассматриваемой экспериментальной производственной киберфизической системы. Для этого была применена модель RAMI 4.0, в частности, было рассмотрено многоаспектное описание объекта в шести слоях нотации модели. Анализ текущего состояния показал, что оборудование не позволяет использовать текущую комплектацию объекта: для подключения и взаимодействия с сервисной шиной рассматриваемому объекту требуется встроенная система управления режимами нагрева и охлаждения, а также сетевой модуль для обеспечения передачи данных сетью промышленного интернета вещей. Было предложено разработать недостающий блок управления на основе одноплатного компьютера на базе Arduino Uno. Спецификация компонента представлена в таблице.

Элемент описания	Характеристика
Объект	Электропечь камерная муфельная
Модель	СНОЛ – 1,6.2,00,8/9-М1 У4.2
Назначение	Операции термообработки, плавления и спекания
Сервисное представление	Сервис „Термическая обработка“ (закалка, отжиг, отпуск, нормализация), сервис „Плавление“, сервис „Спекание“
Состав комплектации	Камерная муфельная электропечь СНОЛ – 1,6.2,00,8/9-М1 У4.2; магнитный пускатель П6 - III У4, 220 В 10 А; милливольтметр Ш4501 по ГОСТ 9736-80; термопара резистивная, шкала ХА (0—1100°C), 0—45,16 мВ
Интеграция: M2M, H2M	Аналоговый индикатор показателей Ш4501
Интерфейсы: физические, логические	—
Протоколы: подключаемость к сети, интероперабельность	—
Датчики и параметры: открытые данные	Датчик температуры в камере — термопара резистивная; милливольтметр — преобразует данные (напряжение термопары; 0—45,16 мВ) в показания температуры рабочей камеры (0—1100 °C)
Синтаксис и семантика	—
Сбор, хранение и обработка данных	Данные отображаются на аналоговом индикаторе показателей
Форматы данных: экспорт / импорт	—

Продолжение таблицы

Элемент описания	Характеристика
Операционное окружение	—
Система управления объектом	Объект управляется магнитным пускателем через управляющее реле (распределитель напряжения АЕ 2046V, 660 В);
Автономность	Электропитание: переменный ток, 220 В, 50 Гц, 2,9 кВт
Гибкость и переналадка	Обеспечивается оператором
Сервисные приложения	—

Граничными параметрами процесса проектирования являются заданные требования к стоимости, срокам и объему работ; дополнительные требования — информация о подключаемости. Так, прототип индустриального агента должен быть реализован с учетом текущей материальной и цифровой инфраструктуры экспериментальной производственной системы.

Модель индустриального агента для камерной муфельной электропечи СНОЛ — 1,6.2,00,8/9-M1 У4.2 приведена на рис. 1. Физический уровень, представленный объектом, обеспечивает взаимодействие индустриального агента с материальными потоками. Интеграционный уровень, представленный технологическим адаптером, обеспечивает подключение физического объекта к цифровой инфраструктуре экспериментальной производственной системы. Административная оболочка обеспечивает коммуникацию и взаимодействие индустриального агента в цифровой среде, а также реализацию требований и функций, соответствующих вышестоящим уровням (коммуникационному, информационному, сервисному, бизнес-описаний) референсной модели RAMI. На рис. 2 представлено многоаспектное описание — спецификация в нотации референсной модели RAMI для модернизированного индустриального агента с использованием предлагаемого технологического адаптера.

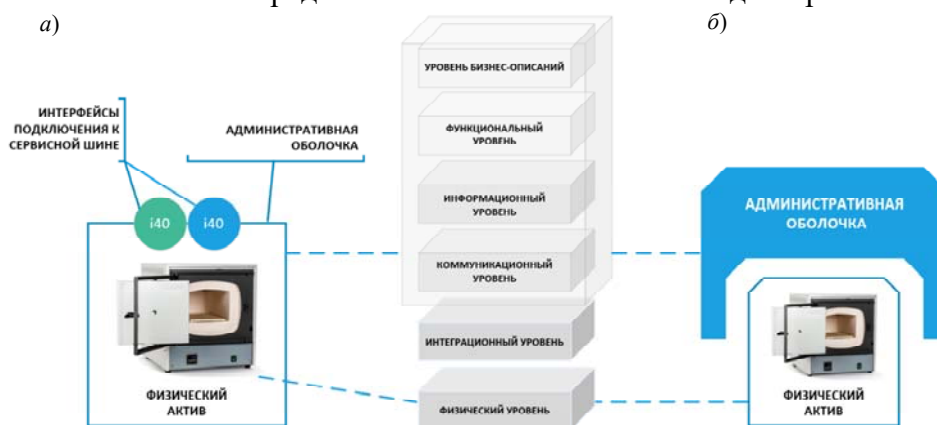


Рис. 1

Рассмотрим вариант реализации индустриального агента с использованием технологического адаптера (рис. 3). Состав комплектации технологического адаптера: одноплатный управляющий компьютер Arduino Uno, Wi-Fi-модуль ESP8266, индукционный датчик положения, линейный двигатель, силовое реле и преобразователь сигналов. Индукционный датчик необходим для формирования управляющего сигнала для задания и контроля целевой температуры нагрева рабочей камеры. Датчик устанавливается на направляющую, ориентированную параллельно аналоговому индикатору показателей Ш4501. Положение датчика управляется с помощью линейного двигателя (вылет — 100 мм). Управляющий сигнал на перемещение поступает от компьютера на двигатель согласно заданному режиму. Датчик перемещается в заданное положение относительно шкалы температур Ш4501. Металлический индикатор перемещается в процессе нагрева камеры и при достижении заданной температуры должен войти в контакт с датчиком (при совмещении в датчике индуцируется ЭДС, преобразуемая в сигнал). Полученный сигнал свидетельствует о достижении объектом заданного показателя температуры данного технологического режима.

Бизнес-уровень	Управление металлургическими процессами плавления и спекания		Управление процессом термической обработки
Функция / Сервис	Спекание порошковой смеси	Термическая обработка	Плавление шихтовой смеси
Информация	Управляющие команды и программы	Основные данные процесса: T, v, t, status	Прочие данные процесса: энергопотребление, обслуживание
Коммуникация	Интернет-протоколы: Wi-Fi, TCP / IPv6	Протокол HART Токовая петля	Протокол ModBus Петля напряжения
Интеграция	Wi-Fi модуль Интерфейс в сеть	Силовое реле	Преобразователь сигналов
Физический уровень	Arduino UNO Управляющий компьютер	П6 – Ш У4 Магнитный пускатель	Аналоговый дисплей
	Индукционный датчик	ТЭН-элемент Источник тепловой энергии	Ш4501 Милливольтметр
	Линейный двигатель	Рабочая камера муфельная	Ш4501 Термометр резистивный ХА (0-1100°C)

Рис. 2

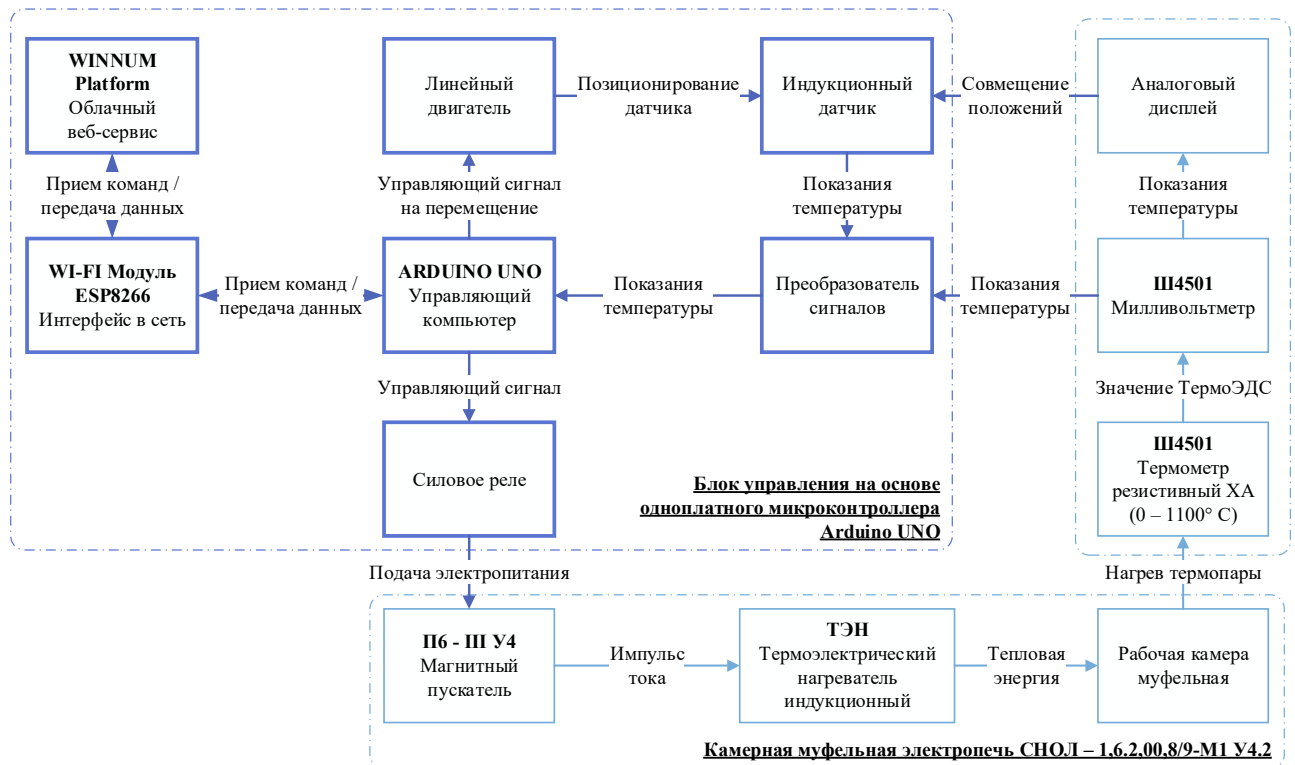


Рис. 3

Управление нагревом рабочей камеры обеспечивается магнитным пускателем, силовым реле и рабочим нагревательным элементом (ТЭН). Компьютер формирует управляющий сигнал в формате протокола HART (управление токовой петлей) согласно технологическому режиму обработки. Сигнал достигает силового реле, встроенного в цепь электропитания оборудования. Силовое реле формирует режим тока и напряжение передается на магнитный пускатель, обеспечивающий подачу импульсов тока на ТЭН. В свою очередь, нагревательный элемент обеспечивает генерацию тепловой энергии.

Моделирование индустриального агента производилось с использованием Autodesk Fusion 360. Разработка прототипа индустриального агента и технологического адаптера производилась с использованием мощностей производственной лаборатории FabLab Bishkek. Прототип технологического адаптера представлен на рис. 4.



Рис. 4

С использованием встроенных средств отладки управляющего блока было проведено функциональное тестирование. Также был произведен мониторинг состояния индустриального агента (рис. 5) — запись рабочих параметров (температуры в рабочей камере).

```
COM4

Industrial Agent - Melting Cell
Initialization ...
Receive a Request datasheet from the Manufacturing Service Bus

Processing ...
Service - Melting
  Material - Copper alloy
  Melting temperature = 900C
  Weight = 0.3kg

Calculating target parameters
Setting the regime parameters
  Target Temperature = 900C
  Start Temperature = 21C
Setting the sensor to target position

Starting the melting process

Current temperature = 25C
Current temperature = 26C
Current temperature = 27C
Current temperature = 28C
Current temperature = 29C
Current temperature = 30C
Current temperature = 31C
Current temperature = 32C
Current temperature = 33C
Current temperature = 34C
Current temperature = 35C
Current temperature = 36C
Current temperature = 37C
Current temperature = 38C
Current temperature = 39C
Current temperature = 40C
```

Рис. 5

Данные о состоянии передавались в систему облачного мониторинга Winnum Platform. Тестирование подключаемости физического объекта с использованием технологического адаптера было пройдено успешно.

Итак, реализация предложенной методики позволяет обеспечить способность физического объекта выступать как индустриальный агент — модульная ячейка „Melting Cell“, предоставляющая возможность проведения операций термообработки, плавления и спекания по запросу в качестве сервисного приложения экспериментальной Smart Factory.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schumacher A., Erol S., Sihn W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises // *Procedia CIRP*. 2016. N 52. P. 161—166.
2. Eppe U. A Reference Architectural Model for Industrie 4.0. Aachen, Germany: RWTH Aachen Univ., 2016.
3. Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K. Cyber-physical systems in manufacturing // *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65, iss. 2. P. 621—641. DOI: [org/10.1016/j.cirp.2016.06.005](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005).
4. Боровков А. И., Лысенко Л. В., Биленко П. Н. и др. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии: Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления Сколково, 2017 [Электронный ресурс]: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf.
5. Демкович Н. А., Абаев Г. Е., Яблочников Е. И. Многоуровневое моделирование цифровых производств // Ритм машиностроения. 2019 [Электронный ресурс]: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf.
6. Yablochnikov E. I., Chukichev A. V., Timofeeva O. S., Abyshov O. A., Abaev G. E., Colombo A. W. Development of an industrial cyber-physical platform for small series production using digital twins // *Philosophical Trans. of the Royal Society A*. 2021. N 379(2207). P. 20200370.
7. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review // Working Pap. 2015.
8. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Madsen E. S. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions // *Procedia Engineering*. 2014. N 69. P. 1184—1190.
9. Manzei C., Schleupner L., Heinze R., Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Berlin: VDE Verlag, 2017.
10. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges Oriented Real-Time Distributed Computation // 11th IEEE Intern. Symp. on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computation. 2008. P. 363—69.
11. Digitalized and Harmonized Industrial Production Systems: The PERFoRM Approach / A. W. Colombo, M. Gepp, J. B. Oliveira, P. Leitao, J. Barbosa, J. Wermann. CRC Press, 2019. 332 p.
12. Zuehlke D. Smart Factory—Towards a factory-of-things // *Annual Reviews in Control*. 2010. N 34(1). P. 129—138.
13. Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach / A. W. Colombo, T. Bangemann, S. Karnouskos, J. Delsing, P. Stluka, R. Harrison, F. Jammes, J. L. Lastra. Springer Science & Business Media, 2014. 245 p.
14. Boyd A., Noller D., Peters P., Salkeld D., Thomas T., Gifford C., Pike S., Smith A. SOA in manufacturing guidebook // *MESA Intern*. 2018. N 27. P. 24—29.
15. Kannengiesser U., Müller H. Towards viewpoint-oriented engineering for Industry 4.0: A standards-based approach // *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. 2018. May. P. 51—56.

Сведения об авторах

Оман Аскарбекович Абышев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: abyshov.o@yandex.ru

Урпия Маматкадыровна Дыйканбаева

— Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, кафедра технологии машиностроения; ст. преподаватель; E-mail: urpia71@gmail.com

Усен Касымович Омуралиев

— канд. техн. наук, профессор; Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, кафедра технологии машиностроения; руководитель кафедры;
E-mail: d.zakoldaev@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

- Schumacher A., Erol S., Sihn, W. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 52, pp. 161–166.
- Epple U. *A Reference Architectural Model for Industrie 4.0*, RWTH Aachen University, 2016.
- Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K. *CIRP Annals*, 2016, no. 2(65), pp. 621–641, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>.
- http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf. (in Russ.)
- Demkovich N.A., Abaev G.E., Yablochnikov E.I. *Ritm mashinostroyeniya*, 2019, https://beepitron.com/files/content/abaev_demkovich_yablochnikov_-_mnogourovnevnoe_modelirovanie_cifrovyyh_proizvodstv.pdf. (in Russ.)
- Yablochnikov E.I., Chukichev A.V., Timofeeva O.S., Abyshev O.A., Abaev G.E. and Colombo A.W. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2021, no. 379(2207), pp. 20200370.
- Hermann M., Pentek T., Otto B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*, Working Pap., 2015.
- Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Madsen E.S. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 1184–1190.
- Manzei C., Schleupner L., Heinze R. *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*, Berlin, VDE VERLAG, 2017.
- Lee E.A. *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computation*, 2008, pp. 363–369.
- Colombo A.W., Gepp M., Oliveira J.B., Leitao P., Barbosa J., Wermann J. *Digitalized and Harmonized Industrial Production Systems: The PERFoRM Approach*, CRC Press, 2019, 332 p.
- Zuehlke D. *Annual Reviews in Control*, 2010, no. 1(34), pp. 129–138.
- Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F., Lastra J.L. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*, Springer Science & Business Media, 2014, 245 p.
- Boyd A., Noller D., Peters P., Salkeld D., Thomas T., Gifford C., Pike S., Smith A. *SOA in manufacturing guidebook*, MESA International, IBM Corporation and Capgemini co-branded white paper, 2008, pp. 24–29.
- Kannengiesser U., Müller H. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, IEEE, 2018, May 15, pp. 51–56.

Data on authors

- Oman A. Abyshev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: abyshev.o@yandex.ru
- Urpia M. Dyikanbaeva** — I. Razzakov Kyrgyz State Technical University, Department of Industrial Engineering; Senior Lecturer; E-mail: urpia71@gmail.com
- Usen K. Omuraliev** — PhD, Professor; I. Razzakov Kyrgyz State Technical University, Department of Industrial Engineering; Head of the Department; E-mail: d.zakoldaev@mail.ru

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ
ДИСКРЕТНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

О. А. АБЫШЕВ*, Е. И. ЯБЛОЧНИКОВ, Д. А. ЗАКОЛДАЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*abyshv.o@yandex.ru

Аннотация. Обсуждаются проблематика и тенденции развития процесса проектирования. Представлен обзор современных требований к проектируемым производственным системам. Рассмотрены этапы развития моделей организации современных производственных систем и обозначена необходимость разработки новых архитектурных моделей таких систем с использованием технологий производственных киберфизических систем. Предложена архитектурная модель сервис-ориентированной производственной системы на основе референсной модели RAMI. Представлен пример реализации предложенной архитектурной модели на базе опытно-экспериментальной фабрики по выпуску магнитных композиционных материалов.

Ключевые слова: производственные системы, автоматизация проектирования, цифровое производство, киберфизические системы, ICPS, RAMI, архитектурная модель производства

Ссылка для цитирования: Абышев О. А., Яблочников Е. И., Заколдаев Д. А. Сервис-ориентированная архитектурная модель дискретной производственной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 43—55. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-43-55.

SERVICE-ORIENTED ARCHITECTURAL MODEL
OF DISCRETE PRODUCTION SYSTEM

O. A. Abyshv*, E. I. Yablochnikov, D. A. Zakoldaev

ITMO University, St. Petersburg, Russia

*abyshv.o@yandex.ru

Abstract. The problems and development trends of the project design process are considered. A review of modern requirements to production systems design is presented. The stages of development of models of organization of modern production systems are analyzed, and the need to develop new architectural models of such systems using technologies of industrial cyber-physical systems is indicated. An architectural model of a service-oriented production system based on the RAMI reference model is proposed. An example of implementation of the proposed architectural model based on a pilot factory for the production of magnetic composite materials is given.

Keywords: production systems, design process automation, digital production, cyber-physical systems, ICPS, RAMI, architectural model of production

For citation: Abyshv O. A., Yablochnikov E. I., Zakoldaev D. A. Service-oriented architectural model of discrete production system. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 43—55 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-43-55.

Высокая динамика изменений потребительских предпочтений и активная конкуренция на рынках сбыта конечных изделий промышленности, в частности предприятий приборостроения, определяют тенденции развития производственных систем [1, 2].

В последнее время значительно повысился уровень использования современных информационно-коммуникационных технологий на всех этапах жизненного цикла производственных систем в целях повышения эффективности и снижения себестоимости процессов проектирования и изготовления продукции [2—4]. Сквозная автоматизация промышленных процессов и цифровая трансформация становятся важнейшими элементами стратегии развития

производственных компаний [2]. Повышается роль информационных потоков и промышленных данных, генерируемых объектами производства и проектно-производственной средой в ходе их взаимодействия в рамках единого информационного пространства предприятия [5—7].

Современное инженерное проектирование столкнулось с новыми вызовами, при этом процесс проектирования дискретных производственных систем имеет следующий ряд ключевых проблем [8]:

- высокая степень неопределенности ожиданий и предпочтений пользователей, влияющих на вариативность конфигураций (кастомизация) конечных изделий и, как следствие, на поиск оптимальных конфигураций производственных систем;
- высокая степень сложности проектирования новых объектов техники и необходимость применения междисциплинарного подхода к проектированию;
- высокая степень гетерогенности объектов проектно-производственной среды и связанная с этим проблема обеспечения вертикальной и горизонтальной интеграции, интероперабельности этих объектов и гибкости производственной системы в целом.

Решение этих проблем требует усовершенствования существующих и поиска новых моделей и методов проектирования и организации производственных систем.

Изучение текущего состояния на предприятиях, например, Евразийского экономического союза (ЕАЭС) указывает на проблемы развития, распространения и внедрения технологий производственных киберфизических систем. Актуальны также вопросы повышения производительности, качества и сокращения скорости процессов проектирования и сроков вывода новой продукции на рынок.

Применительно к предприятиям ЕАЭС [9], изготавливающим, в частности, изделия из магнитных композиционных материалов, следует отметить наиболее значимые проблемы:

- сложность построения единых информационных пространств, доступных как сотрудникам, так и прочим компонентам производственной системы (технологическим машинам, заготовкам, цеховому транспорту, технологической оснастке);
- низкое качество данных, ограничивающих интероперабельность компонентов и системы в целом;
- значительные проблемы обеспечения версионности, мониторинга и поддержки актуальности информации об объектах производственной системы;
- низкий уровень автоматизации процессов проектирования и изготовления продукции; отсутствие сквозной автоматизации процессов;
- применение устаревших стандартов проектирования, при этом стандарты в области Smart Factory и производственных киберфизических систем не распространены в инженерной практике.

В области развития новых производственных систем широко распространены термины „умная фабрика“ и „производственные киберфизические системы“, не имеющие, однако, общепринятых определений на данный момент [10, 11]. Тем не менее объем исследований по этой тематике подтверждает ее значимость.

В настоящей статье авторами выделен следующий порядок формирования и развития моделей организации сложных производственных систем: *традиционное производство --> формирование цифрового производства --> внедрение пилотных производственных киберфизических систем (ПКФС) --> интеллектуальные производства и умные фабрики (модель Smart Factory)*. Используемые в статье понятия „цифровое производство, или цифровая фабрика“, „производственная киберфизическая система“, „умное, интеллектуальное производство, или умная фабрика“ подробно описаны в работах [2, 6,

12—15], а также в статье „Методика построения индустриальных агентов с применением технологических адаптеров“*.

Процесс проектирования современных производственных систем предполагает определение и классификацию типовых групп требований к проектированию. При этом требования — это условие или возможность, которыми должно обладать проектное решение, чтобы удовлетворять ожиданиям клиентов, стандартам и спецификациям на объект проектирования [16].

Обзор научных публикаций показывает, что сегодня существует большое число исследований, посвященных проблеме формализации требований к проектированию производственных систем. В работе [17] авторы определяют шесть основных компонентов производственной киберфизической системы.

1. *Модульные технологическое оборудование и рабочие станции* — позволяют обеспечить переналадку и перекомпоновку производственных участков и ячеек под внешние и внутренние изменения [17—28].

2. *Модульный производственный транспорт и промышленные роботы* — позволяют обеспечить переналадку и перекомпоновку погрузочно-разгрузочного оборудования (т. е. конвейеров, AGV) в цехах, в том числе перемещение технологического оборудования и рабочих станций.

3. *Высококвалифицированная рабочая сила* — определяется способность сотрудников выполнять несколько типов задач, включая принятие решений, контроль и диспетчеризацию, программирование или выполнение ручных операций сборки изделий [17, 23, 29—33].

4. *Переналаживаемые технологические оснастка и приспособления* — определяется необходимость применения переналаживаемых средств технологического оснащения для обеспечения заданной гибкости ассортимента и размерности партий изделий.

5. *Переналаживаемые инструменты* — определяется необходимость применения переналаживаемых инструментов для использования в различных задачах (например, контролируемой затяжке крепежа различного диаметра).

6. *Стандартизированная инженерная инфраструктура* — интегрирует компоненты системы со всеми уровнями инженерных коммуникаций [19, 20, 21, 23, 25, 28, 29, 30, 33—35].

При этом в работах [22—24] авторы расширяют данный список компонентов, определяя специальные требования к проектированию производственных киберфизических систем.

Стандартизированная коммуникация — определяется необходимость применения стандартизированных протоколов и интерфейсов коммуникации и информационного обмена между объектами производственной системы [18, 20, 22, 23, 26, 27, 29, 31—37].

Встроенные вычислительные системы — определяется необходимость интеграции в структуру каждого объекта производственной системы соответствующих встроенных вычислительных систем для решения задачи сбора данных, обработки информации и автономного принятия решений [17, 19, 20, 21, 24, 25, 31, 33, 34].

Организация единого информационного пространства — позволяет обеспечить информационный обмен, повторное использование результатов моделирования, симуляций и вычислений в рамках процесса проектирования, разработки и эксплуатации [20, 24, 28, 29, 36].

Информационная безопасность — определяется необходимость обеспечения средств и механизмов для решения задач защиты информации: конфиденциальности, доступности, целостности, подлинности данных [19, 21, 23, 28, 32].

Коллаборативное взаимодействие компонентов — компоненты системы определяются как агенты, способные к межмашинному и человеко-машинному взаимодействию для реализации общесистемных целей [18, 20, 31, 34].

* Абышев О. А., Дыйканбаева У. М., Омуралиев У. К. Методика построения индустриальных агентов с применением технологических адаптеров // Настоящий выпуск. С. 34—42.

Модульная и децентрализованная архитектура управления — определяется необходимость применения распределенной системы управления компонентами системы; каждый компонент, подключенный к производственной шине предприятия, выступает в качестве индустриального агента, способного к самоидентификации в производственной среде и автоматическому взаимодействию с другими компонентами в виртуальном пространстве [20—23, 26, 27, 29, 30, 32—34, 36].

Умная заготовка — определяется способность заготовки изделия к идентификации в качестве индустриального агента, взаимодействию с другими компонентами, а также сбору, хранению и обработке информации о своем состоянии на всех этапах жизненного цикла; таким образом, умная заготовка выступает в качестве равноправного и самодостаточного объекта производственной системы [21, 26, 27, 30, 34].

Интегрированные средства автоматизации проектирования киберфизических систем — определяется необходимость применения специализированных программных средств и инструментов автоматизированного проектирования для построения киберфизических моделей компонентов и производственной системы, а также информационной поддержки проектных процедур (анализа, синтеза, моделирования, симуляции), в том числе организации управления знаниями в едином информационном пространстве [17, 19, 23—25, 29, 37].

Высокоточные визуальные модели производства — определяется необходимость визуальных моделей реальной производственной среды высокой точности для задач построения виртуального пространства производственной системы.

Удаленный мониторинг и диспетчеризация — определяется необходимость применения технологий удаленного мониторинга и диспетчеризации для сбора промышленных данных о состоянии индустриальных агентов в режиме реального времени и их дальнейшем использовании, а также хранения данных в виртуальном пространстве предприятия [30—32, 34].

Интерфейсы для подключения компонентов к ПКФС — определяется необходимость разработки и использования физических и виртуальных (программных) интерфейсов подключения компонентов к производственной киберфизической системе, в том числе разработки специальных средств для интеграции устаревшего оборудования [17—21, 29—31, 36, 37].

Стандартизация представления результатов виртуального моделирования и симуляции — определяется необходимость применения единых семантик, онтологий, форматов обмена данными при виртуальном моделировании и симуляции для создания киберфизических компонентов, способных к бесшовной интеграции со сторонними производственными киберфизическими системами [36].

Информационная поддержка изделий на всех этапах жизненного цикла — определяется требование к сбору, хранению, обработке и обеспечению доступа к информации о состоянии изделия на всех этапах его жизненного цикла, в том числе на этапе послепродажного обслуживания [17, 19, 24, 26, 28, 32, 36, 38].

Сервисный подход к организации предприятия — производственная система определяется как потребитель и поставщик услуг (сервисов) по запросу, которые она может принимать или оказывать как сторонним предприятиям, так и другим предприятиям одной производственной цепочки [19—21, 23, 27—29, 31—33, 36, 37].

Облачные вычисления — определяется необходимость применения средств и технологий распределенных облачных вычислений для задач проектирования, разработки и эксплуатации производственных систем [18, 23, 28, 30, 36].

Облачное хранение данных — определяется необходимость применения облачных хранилищ для задач организации единого цифрового пространства и хранения данных обо всех ресурсах, продуктах и процессах производственной системы [17, 19, 25, 27—29, 36, 37].

Сервисное взаимодействие с клиентами и поставщиками — определяется необходимость применения электронных торговых площадок (маркетплейсов) для взаимодействия с клиентами и поставщиками услуг [18, 23, 26, 28, 29, 31, 32, 36].

Адаптивность производственной системы — определяется способность системы своевременно реагировать на изменение требований к изготовлению конечных изделий (объему, размеру партий, срокам поставки), в том числе при размещении единичных заказов по модели „same day delivery“ — поставка в день размещения заказа [17, 20—23, 25, 26, 32, 34, 36].

Самовосстановление — определяется способность системы самостоятельно восстанавливаться после системных сбоев и атак в режиме реального времени [18, 20, 26, 29, 30, 31].

Анализ литературных источников показывает принципиальную возможность классификации и группирования требований к исследуемому объекту проектирования путем определения соответствующих прикладных областей и технологий. Согласно этим группам должны быть определены направления прикладных разработок — новые методики и средства автоматизированного проектирования производственных киберфизических систем.

1. Перспективы применения концепции ПКФС „Smart Factory“.
2. Применение методов и средств системной инженерии.
3. Место человека в ПКФС „Smart Factory“.
4. Модели и механизмы коммуникации в производственной среде.
5. Система управления ПКФС „Smart Factory“.
6. Технологии цифровых двойников.
7. Технологии предиктивного технического обслуживания.

Следует отметить, что на сегодняшний день мировое сообщество не имеет достаточного количества признанных стандартов в области проектирования и эксплуатации производственных систем [14]. Это приводит к отсутствию координации при разработке решений — каждый производитель компонентов стремится предложить свой вариант, что может привести к увеличению стоимости интеграции в будущем. При этом недостаток связанности гетерогенных компонентов напрямую влияет на качество и скорость принятия решений.

Рассмотрим существующие подходы и модели, используемые в процессе проектирования дискретных производственных систем. Современное автоматизированное проектирование производственных систем основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде классических методологий и подходов к проектированию сложных объектов [39—41]. Выделяют следующие подходы к проектированию:

— *блочно-иерархический подход* — декомпозиционный подход, основанный на разделении описаний объектов и соответственно средств их создания на иерархические уровни и аспекты; проектируемая система декомпозируется на иерархически связанные уровни;

— *объектно-ориентированный подход* — методология, основанная на представлении проекта в виде совокупности объектов, каждый из которых является реализацией определенного класса, а классы образуют иерархию с использованием наследования;

— *сервис-ориентированный подход* — подход, основанный на представлении проекта в виде совокупности сервисов, каждый из которых является отдельным компонентом с фиксированными интерфейсами, выполняющими определенные функции.

Классическая модель автоматизации непрерывных, дискретных и серийных производств использует блочно-иерархический подход к проектированию производственных систем. Этот подход хорошо исследован и стандартизирован. Основой для его реализации является стандарт ISA-95, определяющий блочно-иерархическую модель организации дискретных производственных систем.

На сегодняшний день моделям на основе блочно-иерархического подхода противопоставляются сетевые модели с использованием сервис-ориентированного подхода к проектированию [14, 41, 42]. В сетевых моделях любой объект производственной системы (заготовка,

оператор, технологическое оборудование) становится автономным интеллектуальным агентом, способным к самостоятельному принятию решений (маршрут обработки, состав спецификации и т.д.) и взаимодействию с другими объектами в рамках поставленных задач и в пределах заданной производственной экосистемы. Каждый из отдельных элементов производственной системы, такой как обрабатывающий центр, производственная ячейка, становится сервисом; сервисы обеспечивают обслуживание заготовок в рамках своих функциональных возможностей.

Архитектурная модель — это абстрактное описание поведения, состояния и свойств системы на уровне концептуального проектирования, определяющее ключевые элементы, взаимосвязи между элементами и основные принципы проектирования и развития описываемой системы [14]. Совершенствование существующих и разработка новых архитектурных моделей и методик, способных отвечать современным требованиям к проектированию производственных систем, является актуальной исследовательской задачей [43]. Анализ рассмотренных выше требований показывает, что архитектурная модель производственной системы должна удовлетворять следующим условиям:

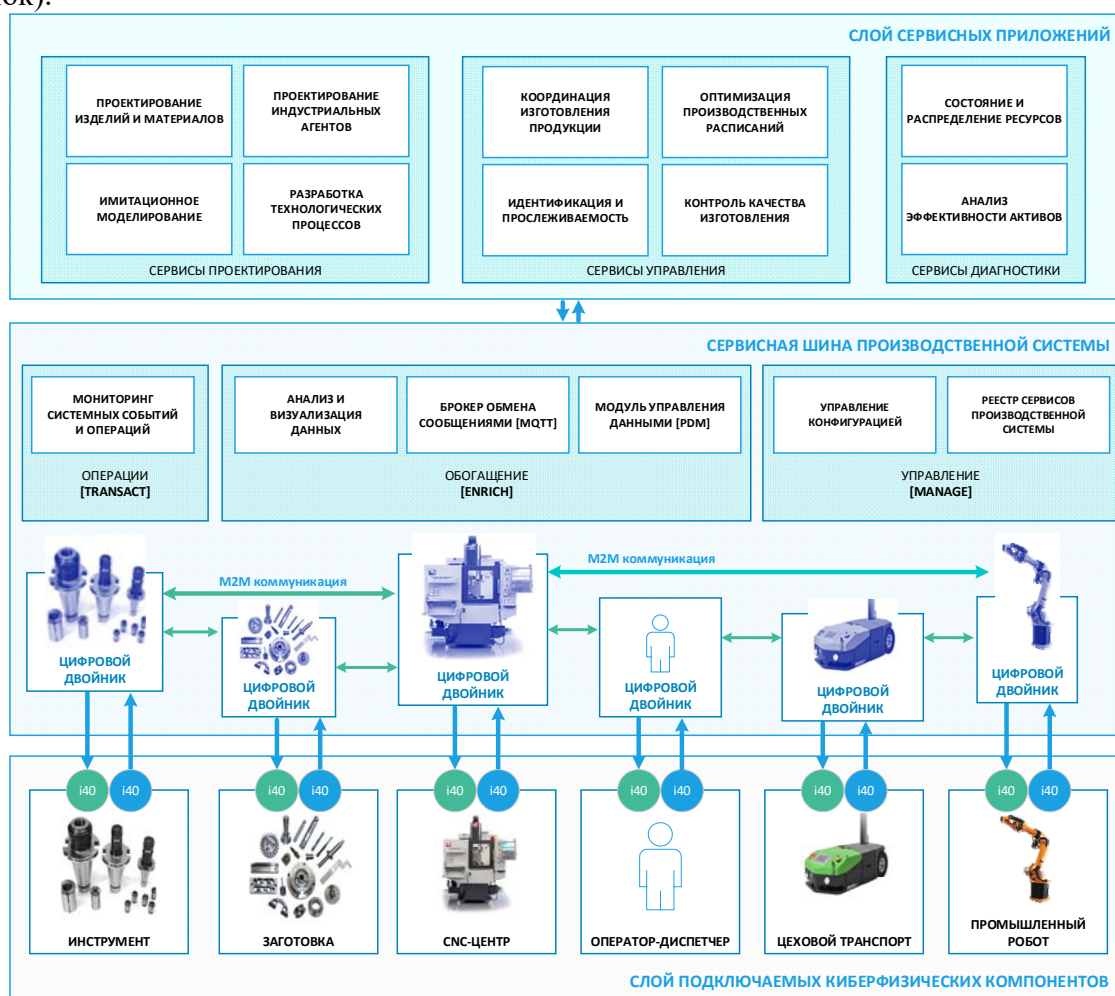
- 1) базироваться на интеллектуальных гетерогенных модульных компонентах (индустриальных агентах);
- 2) обеспечивать гибкость к изменениям требований и внешних условий посредством изменения состава, структуры и свойств системы;
- 3) обеспечивать бесшовную реконфигурацию и переналадку системы;
- 4) обеспечивать оптимизацию операций планирования, моделирования и симуляции;
- 5) обеспечивать административную и информационную поддержку операторам системы.

Особый интерес вызывает референсная архитектурная модель Reference Architecture Model for Industrie 4.0 (RAMI) [44]. Данная модель базируется на общепринятом стандарте иерархического проектирования ISA-95, парадигме управления жизненным циклом на основе стандарта IEC 62890, а также заданном множестве аспектов проектирования. Модель RAMI определяет пространство множества проектных решений для различных гетерогенных компонентов в проектно-производственной среде предприятия. В работах [45—47] предлагаются способы использования данной модели как методического обеспечения процесса проектирования, однако существенным ее недостатком является ограниченность использования при разработке проектных решений по интеграции гетерогенных компонентов в составе производственной киберфизической системы. Тем не менее рассмотренная референсная модель может служить методической основой для разработки сервис-ориентированных архитектурных моделей, способных компенсировать ее недостатки.

В работах [14, 42, 48] приведены результаты и достижения европейской школы проектирования в области технологий производственных киберфизических систем, в частности исследовательский проект PERFoRM, выполняемый в рамках программы исследований Европейского Союза HORIZON 2020. Так, предложены варианты исполнения облачной сервис-ориентированной архитектуры на основе организации межмашинной коммуникации с использованием облачной инфраструктуры. Ключевая идея данной архитектуры заключается в развитии принципов гибкости и адаптивности управления сложными техническими системами за счет повышения уровня внедрения встроенных вычислительных систем в объекты и децентрализации процессов управления с уровня управления предприятием на уровень межмашинной коммуникации — построения интеллектуальных производственных ячеек, состоящих из двух ключевых элементов: физического объекта и административной оболочки. Недостатком предложенной модели является ограниченное количество сервисных приложений, в том числе отсутствие сервисов проектирования компонентов. Модель не содержит сервисы управления и поддержки сервисной шины производственной системы предприятия.

В работе [41] предложена сервис-ориентированная архитектура „Manufacturing 2.0“ для производственных систем, которая учитывает возможность управления конфигурациями набора сервисных приложений, а также выделяет уровень сервисов управления и поддержки сервисной шины производственной системы. Недостатки данной модели — сосредоточенность на вопросах управления производством, отсутствие сервисов проектирования и несогласованность с моделью RAMI 4.0. Модель не учитывает вопросы интеграции физических объектов и их цифровых представлений, подключения устаревшего оборудования, а также не рассматривает возможность использования облачных сервисов.

На основе исследования достоинств и недостатков различных моделей авторами настоящей статьи предлагается улучшенная сервис-ориентированная архитектурная модель производственной системы, которая позволяет проектировать инвариантные производственные системы, обладающие независимостью по отношению к изготовителям и поставщикам комплектующих компонентов и технологических решений за счет использования единых стандартизированных моделей данных, интерфейсов подключения и протоколов обмена (см. рисунок).



Предлагаемая архитектурная модель содержит следующие элементы:

- слой сервисных приложений, в том числе облачных сервисов;
- выделенные группы сервисов (проектирование, управление, диагностика);
- сервисную шину производственной системы со встроенными сервисами управления и поддержки, входящими во внутренние сервисы сервисной шины;
- модуль управления данными о продуктах, процессах и ресурсах;

— слой подключаемых киберфизических компонентов — промышленных агентов и соответствующих интерфейсов подключения (стандартизированный интерфейс или технологический адаптер).

Слой сервисных приложений включает в себя как встроенные сервисные приложения, доступные в рамках базовой конфигурации производственной системы, так и сторонние приложения, расширяющие функционал базовой конфигурации. Так, например, сервис управления эффективностью технологического оборудования, сервис объемного планирования и составления расписаний, сервисы цифрового инжиниринга и т.д. Данные сервисные приложения могут быть выделены в группы: сервисы проектирования, сервисы управления, сервисы диагностики и т.д.

Сервисная шина производственной системы выступает в качестве инфраструктуры для вертикальной и горизонтальной интеграции компонентов системы: гетерогенных сервисных приложений и промышленных агентов. Она обеспечивает обработку событий, маршрутизацию и трансформацию форматов сообщений между различными компонентами системы, унификацию интерфейсов и конвертацию различных протоколов коммуникации. При этом сама сервисная шина имеет выделенные компоненты, которые обеспечивают ее функционирование: реестр сервисов, брокер обмена сообщениями, облачная инфраструктура, встроенные сервисы проектирования, управления конфигурацией, диагностики сервисной шины и т.д.

Модуль управления данными представлен унифицированной моделью данных и системой управления единой базой данных об изделиях, процессах и ресурсах в составе производственной системы в режиме реального времени. Переход от этапа проектирования к этапу изготовления и далее эксплуатации сопровождается генерацией, хранением и обменом огромного количества промышленных данных о составе, структуре, свойствах и состоянии объектов. При этом модуль должен обеспечивать защиту информации, требования к полноте, непротиворечивости и актуальности данных. Реализация модуля может включать использование технологий обработки больших данных (big data processing), хранилищ данных (data warehouse), облачной инфраструктуры (cloud infrastructure). Модуль управления данными и его элементы являются частью информационного обеспечения и осуществляют информационную поддержку всех этапов жизненного цикла производственной системы и ее компонентов.

Слой подключаемых киберфизических компонентов представлен промышленными агентами, представленными, в свою очередь, физическим и цифровым объектами. В качестве физических объектов производственной системы могут выступать технологическое оборудование в составе производственных ячеек, мобильные транспортные устройства, отдельные компоненты автоматизации или люди. Эти объекты обладают такими характеристиками, как интеллектуальность, идентифицируемость и прослеживаемость, автономность, самодиагностируемость и способность взаимодействовать с другими объектами производственной системы. Цифровое представление объекта обеспечивается технологиями цифровых двойников, которые содержат информацию о физическом объекте (электронные макеты, 3D-модели, имитационные модели и результаты симуляций, проектные документы и технические спецификации и т.д.), а также обеспечивают его коммуникацию с другими промышленными агентами. Интеграция физического и цифрового представлений реализуется за счет применения стандартизированных интерфейсов и/или специальных технологических адаптеров (применительно для подключения устаревшего оборудования).

Рассмотрим предложенную архитектурную модель на примере варианта реализации проекта производственной системы по изготовлению магнитных композиционных материалов:

- сервисы проектирования: Autodesk Fusion 360, сервис проектирования композиционных материалов „Composite Designer“;
- сервисы управления: Winnum MES App, Winnum CNC;

- сервисы диагностики: Winnum Diagnostic Apps (мониторинг, планирование, станки);
- сервисная шина: Winnum Platform, Winnum Cloud;
- модуль управления данными о продуктах, процессах и ресурсах: Winnum Platform, Autodesk Vault PDM;
- слой подключаемых киберфизических компонентов: подключенное технологическое оборудование с использованием Winnum Connector и технологических адаптеров (дозатор, магнетизер, муфельная печь и т.д.), умные заготовки с поддержкой идентификации и прослеживаемости, операторы с элементами носимой электроники (человеко-машинный интерфейс).

Данная конфигурация была реализована на опытно-экспериментальной фабрике по выпуску магнитных композиционных материалов совместно с ОсОО „КиргизПромТехнология“ (Бишкек, Киргизия). Так, использование предложенной конфигурации позволило провести прототипирование опытной партии изделий. Аспекты построения имитационной модели данной производственной системы рассмотрены в работе [49].

Прикладная значимость предлагаемой архитектурной модели заключается в возможности конфигурирования состава, структуры и свойств проектируемой производственной системы путем управления интеграцией различных гетерогенных компонентов (в том числе, устаревшего технологического оборудования и новых сервисных программных приложений). Это позволяет сформировать специализированную композицию производственной системы по заданным требованиям.

Существенным ограничением для реализации предлагаемой архитектурной модели является недостаточный уровень готовности методического, математического и программно-алгоритмического обеспечения процесса проектирования подключенных киберфизических компонентов. Проектировщикам производственных систем необходимы формальные методики и алгоритмы проектных процедур, а также современные инструментальные платформенные решения, позволяющие формировать интегрированные комплексы САПР на основе модульных сервисных САПР для задач проектирования киберфизических систем. Это, в свою очередь, определяет необходимость разработки специализированных программных средств и инструментов автоматизированного проектирования для построения производственной киберфизической системы, а также информационной поддержки проектных процедур (анализа, синтеза, моделирования, симуляции), в том числе организации управления знаниями в едином информационном пространстве для повышения доступности и прозрачности данных на всех этапах жизненного цикла. На этапе инжиниринга это открывает возможность совместного непрерывного цифрового проектирования и виртуального ввода в эксплуатацию, а на этапе эксплуатации и технического обслуживания повышает надежность безотказной работы и оперативность реакции на возникновение неисправностей и сбоев производственной системы.

Итак, в работе представлены анализ проблематики процесса проектирования и обзор современных требований к проектируемым производственным системам. Рассмотрены этапы развития организации производств будущего: формирование цифрового производства --> внедрение пилотных индустриальных киберфизических систем --> умные фабрики (модель Smart Factory). Показана необходимость разработки индустриальных киберфизических систем на основе отмеченных требований. Предложена архитектурная модель сервис-ориентированной производственной системы на основе референсной модели RAMI. Представлен пример реализации предложенной архитектурной модели на базе опытно-экспериментальной фабрики по выпуску магнитных композиционных материалов.

Использование комбинации референсной модели RAMI 4.0 и предложенной архитектурной модели позволит обеспечить интероперабельность и подключаемость различного слабосвязанного гетерогенного оборудования и программных модулей в единое информационное

пространство цифрового производства, что, в свою очередь, позволит формировать сквозную интеграцию материальных и информационных потоков на предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. OECD Digital Economy Outlook 2017. Paris: OECD Publ., 2017. DOI: 10.1787/9789264276284-en.
2. Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K. Cyber-physical systems in manufacturing // CIRP Annals. 2016. Vol. 65, iss. 2. P. 621—641. DOI: ORG/10.1016/J.CIRP.2016.06.005.
3. Боровков А. И., Лысенко Л.В., Биленко П.Н. и др. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии: Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления Сколково, 2017 [Электронный ресурс]: <http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf>.
4. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Информационные технологии в проектировании и производстве. СПб: Политехника, 2008. 304 с.
5. Yablochnikov E. I., Chukichev A. V., Timofeeva O. S., Aabyshv O. A., Abaev G. E., Colombo A. W. Development of an industrial cyber-physical platform for small series production using digital twins // Philosophical Trans. of the Royal Society A. 2021. N 379(2207). P. 20200370.
6. Демкович Н. А., Абаев Г. Е., Яблочников Е. И. Многоуровневое моделирование цифровых производств // Ритм машиностроения. 2019 [Электронный ресурс]: <http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf>.
7. Чукичев А. В., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Развитие производственно-технологической лаборатории как прототипа индустриальной киберфизической системы // Современное машиностроение. Наука и образование. 2020. № 9. С. 43—54.
8. Schumacher A., Erol S., Sihn W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises // Procedia CIRP. 2016. N 52. P. 161—166.
9. Новикова И. В., Равино А. В. Определение страновых особенностей цифровизации в государствах ЕАЭС // Тр. БГТУ. Сер. 5: Экономика и управление. 2022. № 1(256) [Электронный ресурс]: <<https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-stranovyh-osobennostey-tsifrovizatsii-v-gosudarstvah-eaes>>.
10. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Madsen E. S. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions // Procedia Engineering. 2014. N 69. P. 1184—1190.
11. Рот А. и др. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики / Пер. с нем.; под. ред. А. Рота. М.: Техносфера, 2017. 294 с.
12. Manzei C., Schleupner L., Heinze R. Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Berlin: VDE Verlag, 2017.
13. Lee E. A., Cyber Physical Systems: Design Challenges Oriented Real-Time Distributed Computation // 11th IEEE Intern. Symp. on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computation. 2008. P. 363—69;
14. Digitalized and Harmonized Industrial Production Systems: The PERFoRM Approach / A. W. Colombo, M. Gepp, J. B. Oliveira, P. Leitao, J. Barbosa, J. Wermann // CRC Press. 2019. 332 p.
15. Zuehlke D. Smart Factory—Towards a factory-of-things // Annual Reviews in Control. 2010. N 34(1). P. 129—138.
16. Вигерс К., Бутти Д. Разработка требований к программному обеспечению. М.: Изд-во „Русская редакция“. 2004.
17. Gorecky D., Weyer S., Hennecke A., Zühlke D. Design and Instantiation of a Modular System Architecture for Smart Factories // IFAC-PapersOnLine. 2016. N 49. P. 79—84.
18. Lee J. Smart Factory Systems // Informatik Spektrum. 2015. N 38. P. 230—235.
19. Arnold C., Kiel D., Voigt K. Innovative Business Models for the Industrial Internet of Things // 26th Intern. Association for Management of Technology Conference (IAMOT). 2017. P. 1379—1396.
20. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review // Working Pap. 2015.

21. *Stock T., Seliger G.* Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2016. N 40. P. 536—541.
22. *Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Skov E.* The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions // *Procedia Engineering*. 2014. N 69.
23. *Davis J., Edgar T., Porter J., Bernaden J., Sarli M.* Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance // *Comput. Chem. Eng.* 2012. N 47. P. 145—156.
24. *Gentner S.* Industry 4.0: Reality, Future or just Science Fiction? How to Convince Today's Management to Invest in Tomorrow's Future! Successful Strategies for Industry 4.0 and Manufacturing IT // *CHIMIA Intern. J. Chem.* 2016. N 70. P. 628—633.
25. *Li X., Li D., Wan J., Vasilakos A. V., Lai C. F., Wang S.* A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0 // *Wireless Networks*. 2017. N 23. P. 23—41.
26. *Qin J., Liu Y., Grosvenor R.* A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond // *Procedia CIRP*. 2016. N 52. P. 173—178.
27. *Rauch E., Dallasega P., Matt D. T.* The Way from Lean Product Development (LPD) to Smart Product Development (SPD) // *Procedia CIRP*. 2016. N 50. P. 26—31.
28. *Vogel-Heuser B., Hess D.* Guest Editorial Industry 4.0 Prerequisites and Visions // *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2016. N 13. P. 411—413.
29. *Oesterreich T. D., Teuteberg F.* Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry // *Comput. Ind.* 2016. N 83. P. 121—139.
30. *Kolberg D., Zühlke D.* Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. N 28. P. 1870—1875.
31. *Kannan S. M., Suri K., Cadavid J., Barosan I., Van Den Brand M., Alferez M., Gerard S.* Towards Industry 4.0: Gap analysis between current automotive MES and industry standards using model-based requirement engineering // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Software Architecture Workshops (ICSAW)*, Gothenburg, Sweden, 5—7 April 2017. P. 29—35.
32. *Cheng S. Q. K., Cheng K.* Future Digital Design and Manufacturing: Embracing Industry 4.0 and Beyond // *Chinese J. Mech. Eng.* 2017. N 30. P. 1047—1049.
33. *Dugenske A., Louchez A.* The Factory of The Future Will Be Shaped by The Internet of Things // *Advant. Bus. Media*. 2014. N 19. P. 1—5.
34. *Erol S., Jäger A., Hold P., Ott K., Sihm W.* Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production // *Procedia CIRP*. 2016. N 54. P. 13—18.
35. *Robert H., Daniel V., Bilal A.* Engineering the Smart Factory // *Chinese J. Mech. Eng.* 2016. N 29. P. 1046—1051.
36. *Yao X., Jin H., Zhang J.* Towards a wisdom manufacturing vision // *Intern. J. Comput. Integr. Manuf.* 2015. N 28. P. 1291—1312.
37. *Xun X.* From cloud computing to cloud manufacturing // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2012. N 28. P. 75—86.
38. *Akeson L.* Industry 4.0: Cyber-Physical Systems and Their Impact on Business Models: Master's Thesis, Karlstads University, Karlstad, Sweden, 2016.
39. ISA-95. Enterprise-Control System Integration: Стандарт проектирования интегрированных производств [Электронный ресурс]: <<https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95>>.
40. *Быков В. П.* Методическое обеспечение САИП в машиностроении Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
41. *Boyd A., Noller D., Peters P., Salkeld D., Thomas T., Gifford C., Pike S., Smith A.* SOA in manufacturing guidebook // *MESA Intern.* 2018. N 27. P. 24—29.
42. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach / A. W. Colombo, T. Bangemann, S. Karnouskos, J. Delsing, P. Stluka, R. Harrison, F. Jammes, J. L. Lastra.* Springer Science & Business Media, 2014. 245 p.

43. Usländer T., Eppe U. Reference model of Industrie 4.0 Service architectures: Basic concepts and approach // *at-Automatisierungstechnik*. 2015. N 63(10). P. 858—866.
44. Eppe U. A Reference Architectural Model for Industrie 4.0. Aachen, Germany: RWTH Aachen Univ. 2016.
45. Park H. S., Febriani R. A. Modelling a platform for smart manufacturing system // *Procedia Manufacturing*. 2019. N 38. P.1660—1667.
46. Kannengiesser U., Müller H. Towards viewpoint-oriented engineering for Industry 4.0: A standards-based approach // *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. 2018, May. P. 51—56.
47. Wang Y., Towara T., Anderl R. Topological approach for mapping technologies in reference architectural model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) // *Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2017. Vol. 2. P. 25—27.
48. European Commission website. Production harmonized Reconfiguration of Flexible Robots and Machinery [Электронный ресурс]: <<https://cordis.europa.eu/project/id/680435>>.
49. Abyshev O., Yablochnikov E. Research and Development of a Service-oriented Architecture for a Smart Factory Production System // *Conf. of Open Innovations Association, FRUCT 2021*. N 29. P. 395—399.

Сведения об авторах

Оман Аскарбекович Абышев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: abyshev.o@yandex.ru

Евгений Иванович Яблочников

— канд. техн. наук, доцент

Данил Анатольевич Заколдаев

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; декан факультета; E-mail: d.zakoldaev@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. *OECD Digital Economy Outlook 2017*, Paris, OECD Publishing, 2017, DOI: 10.1787/9789264276284-en.
2. Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh W., Ueda K. *CIRP Annals*, 2016, no. 2(65), pp. 621–641, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>.
3. http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf. (in Russ.)
4. Zilberburg L.I., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve* (Information Technology in Design and Production), St. Petersburg, 2008, 304 p. (in Russ.)
5. Yablochnikov E.I., Chukichev A.V., Timofeeva O.S., Abyshev O.A., Abaev G.E. and Colombo A.W. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2021, no. 379(2207), pp. 20200370.
6. Demkovich N.A., Abaev G.E., Yablochnikov E.I. *Ritm mashinostroyeniya*, 2019, https://beepitron.com/files/content/abaev_demkovich_yablochnikov_-_mnogourovnevnoe_modelirovanie_cifrovyyh_proizvodstv.pdf. (in Russ.)
7. Chukichev A.V., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. *Modern engineering. Science and education*, 2020, no. 9, pp. 43–54. (in Russ.)
8. Schumacher A., Erol S., Sih W. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 52, pp. 161–166.
9. Novikova I.V., Ravino A.V. *Proceedings of BSTU*, 2022, no. 1(256), <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-stranovykh-osobennostey-tsifrovizatsii-v-gosudarstvakh-eaes>. (in Russ.)
10. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Madsen E.S. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 1184–1190.
11. *Umsetzung und Entwicklung von Industrie 4.0. Grundlagen, Modellierung und Fallstudien*, Springer, 2016.
12. Manzei C., Schleupner L., Heinze R. *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*, Berlin, VDE VERLAG, 2017.
13. Lee E.A. *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computation*, 2008, pp. 363–369.
14. Colombo A.W., Gepp M., Oliveira J.B., Leitao P., Barbosa J., Wermann J. *Digitalized and Harmonized Industrial Production Systems: The PERFoRM Approach*, CRC Press, 2019, 332 p.
15. Zuehlke D. *Annual Reviews in Control*, 2010, no. 1(34), pp. 129–138.
16. Wieggers K.E., Beatty J. *Software Requirements*, 3rd Edition, 2013.
17. Gorecky D., Weyer S., Hennecke, A., Zühlke D. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, pp. 79–84
18. Lee J. *Smart Factory Systems. Informatik Spektrum*, 2015, vol. 38, pp. 230–235.
19. Arnold C., Kiel D.; Voigt K. *Innovative Business Models for the Industrial Internet of Things*, BHM, 2017, vol. 162, pp. 371–381.
20. Hermann M., Pentek T., Otto B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*, Working Pap., 2015.
21. Stock T., Seliger G. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 40, pp. 536–541.
22. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Skov E. *Procedia Eng.*, 2014, vol. 69.
23. Davis J., Edgar T., Porter J., Bernaden J., Sarli M. *Comput. Chem. Eng.*, 2012, vol. 47, pp. 145–156.
24. Gentner S. *CHIMIA Int. J. Chem.*, 2016, vol. 70, pp. 628–633.

25. Li X., Li D., Wan J., Vasilakos A.V., Lai C.F., Wang S. *Wirel. Netw.*, 2017, vol. 23, pp. 23–41.
26. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 52, pp. 173–178.
27. Rauch E., Dallasega P., Matt D.T. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 50, pp. 26–31.
28. Vogel-Heuser B., Hess D. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, 2016, vol. 13, pp. 411–413.
29. Oesterreich T.D., Teuteberg F. *Comput. Ind.*, 2016, vol. 83, pp. 121–139.
30. Kolberg D., Zühlke D. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 28, pp. 1870–1875.
31. Kannan S.M., Suri K., Cadavid J., Barosan I., Van Den Brand M., Alferez M., Gerard S. *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW)*, Gothenburg, Sweden, April 5–7, 2017, pp. 29–35.
32. Cheng S.Q.K., Cheng K. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2017, vol. 30, pp. 1047–1049.
33. Dugenske A., Louchez A. *Advant. Bus. Media*, 2014, vol. 19, pp. 1–5.
34. Erol S., Jäger A., Hold P., Ott K., Sihm W. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 54, pp. 13–18.
35. Robert H., Daniel V., Bilal A. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2016, vol. 29, pp. 1046–1051.
36. Yao X., Jin H., Zhang J. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 2015, vol. 28, pp. 1291–1312.
37. Xun X. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2012, vol. 28, 75–86.
38. Akeson L. *Industry 4.0: Cyber-Physical Systems and Their Impact on Business Models*, Master's Thesis, Karlstads University, Karlstad, Sweden, 2016.
39. ISA-95. *Enterprise-Control System Integration*, <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95>.
40. Bykov V.P. *Metodicheskoye obespecheniye SAPR v mashinostroyenii* (Methodological Support of CAD in Mechanical Engineering), Leningrad, 1989, 255 p. (in Russ.)
41. Boyd A., Noller D., Peters P., Salkeld D., Thomasma T., Gifford C., Pike S., Smith A. *SOA in manufacturing guidebook*, MESA International, IBM Corporation and Capgemini co-branded white paper, 2008, pp. 24–29.
42. Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F., Lastra J.L. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*, Springer Science & Business Media, 2014, 245 p.
43. Usländer T., Eppele U. *at-Automatisierungstechnik*, 2015, no. 10(63), pp. 858–866.
44. Eppele U. *A Reference Architectural Model for Industrie 4.0*, RWTH Aachen University, 2016.
45. Park H.S., Febriani R.A. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 38, pp. 1660–1667.
46. Kannengiesser U., Müller H. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, May 15, 2018, IEEE, pp. 51–56.
47. Wang Y., Towara T., Anderl R. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2017, vol. 2, pp. 25–27.
48. *European Commission website. Production harmonizEd Reconfiguration of Flexible Robots and Machinery url: <https://cordis.europa.eu/project/id/680435>*
49. Abyshev O., Yablochnikov E. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT 2021*, no. 29, pp. 395–399.

Data on authors

- | | |
|-------------------------------|---|
| Oman A. Abyshev | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: abyshev.o@yandex.ru |
| Evgeny I. Yablochnikov | — Ph.D., Associated Professor |
| Danil A. Zakoldaev | — Ph.D., Associated Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; Dean of the Faculty; E-mail: d.zakoldaev@mail.ru |

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.

МЕТОДИКА ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ РОТАЦИОННОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Т. В. БАСОВА^{1*}, Ю. С. АНДРЕЕВ¹, М. В. БАСОВА²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* tvbasova@itmo.ru

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

Аннотация. Предложена новая методика операционного контроля режущего инструмента с применением бесконтактных датчиков его наладки и рассмотрены основные трудности контроля инструмента в производстве. Разработанная методика позволяет повысить уровень автоматизации технологической подготовки производства за счет применения рекомендованной разработанной базы данных технических параметров инструмента и усовершенствования алгоритма обработки результатов измерений, полученных бесконтактными датчиками наладки инструмента. Контроль по новой методике повышает эффективность производства участков, на которых размещены станки с ЧПУ, и обеспечивает заданное качество изготовления деталей. Преимущества методики — экономичность решения за счет применения только штатных датчиков станков с ЧПУ, а также исключение ручной обработки результатов измерений. Актуальность работы обусловлена распространенностью применения ротационного фрезерного инструмента в технологии современного приборостроительного и машиностроительного производства.

Ключевые слова: износ режущего инструмента, методика, циклы измерения, операционный контроль, ротационный режущий инструмент, станки с ЧПУ, датчик наладки инструмента, алгоритмы

Благодарности: работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 17984ГУ/2022 от 26.05.2022).

Ссылка для цитирования: Басова Т. В., Андреев Ю. С., Басова М. В. Методика операционного контроля ротационного режущего инструмента на станках с числовым программным управлением // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 56—65. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-56-65.

METHOD OF OPERATIONAL CONTROL OF A ROTARY CUTTING TOOL ON MACHINE TOOLS WITH NUMERICAL CONTROL

T. V. Basova^{1*}, Yu. S. Andreev¹, M. V. Basova²

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

* tvbasova@itmo.ru

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

Abstract. A new method of operational control of a rotary cutting tool with the use of non-contact tools setters is proposed, and main difficulties of rotary cutting tools control in a manufacturing plant are considered. The developed technique makes it possible to increase the level of automation of technological preparation of production through the use of recommended database of the tool technical parameters and improvement of the algorithm for processing the measurement results obtained by non-contact tool setting sensors. Control performed in accordance with the new method increases the efficiency of the production of sections where CNC machines are located and ensures the specified quality of parts manufacturing. The advantages of the technique are the cost-effectiveness of the solution due to the use of only standard sensors of CNC machines, as well as the exclusion of manual processing of measurement results. The relevance of the work is due to the prevalence of the use of rotary milling tools in the technology of modern instrument-making and machine-building enterprises.

Keywords: cutting tool wear, methodology, measurement cycles, operational control, rotary cutting tool, CNC machines, tool adjustment sensor, algorithms

Acknowledgment: the work was carried out with the support of the Innovation Assistance Fund (Contract No. 17984GU/2022 dated 05/26/2022).

For citation: Basova T. V., Andreev Yu. S., Basova M. V. Method of operational control of a rotary cutting tool on machine tools with numerical control. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 56—65 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-56-65.

Введение. Широкое применение ротационного режущего инструмента (РРИ) на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) обусловлено, в частности, возможностью повышения производительности изготовления деталей, что особенно важно при обработке перспективных материалов, используемых в приборостроительной, авиационной, космической, атомной промышленности [1]. Возможными причинами, снижающими точность механической обработки деталей, а также производительность обрабатывающих станков с ЧПУ, являются превышение максимально допустимого износа режущего инструмента и неполная автоматизация процесса технологической подготовки производства [2]. Это в результате приводит к 1) снижению параметров режимов резания в два раза, а в некоторых случаях и в 5 раз относительно рекомендуемых производителями РРИ, 2) простоям, вызванным отказом режущего инструмента, а значит, низкой эффективности производства, 3) высокой вероятности технологического брака, 4) несоблюдению требуемого качества изготовления детали и 5) увеличению себестоимости изготовления детали [3].

Изменение геометрии режущего клина может привести как к возрастанию сил резания, так и к появлению вибраций в процессе обработки [4, 5]. Некорректное определение координат нулевой точки режущего инструмента на станке с ЧПУ (наладка инструмента) также может привести к технологическому браку. Эти факторы особенно сильно выражены при работе с фасонным РРИ, таким как резьбовая фреза [6—8]. Автоматизированное измерение и привязка РРИ для станка с ЧПУ выполняются контактными и бесконтактными датчиками наладки инструмента [9], однако при работе датчиков наладки по алгоритму, заложенному по умолчанию, невозможно обеспечить операционный контроль РРИ без вмешательства специалистов в технологическую систему. В итоге недостатки данной производственной методики — одна из основных проблем обеспечения как эффективности функционирования участков, на которых размещены станки с ЧПУ, так и качества изготовления деталей.

Таким образом, при автоматизированном изготовлении деталей на станках с ЧПУ вопросы повышения качества их изготовления и контроля РРИ являются крайне важными, особенно в связи с тенденцией к исключению участия человека в работе технологической системы [10—14]. В этой связи актуальна разработка простой и экономичной системы мониторинга состояния РРИ с минимальным количеством устанавливаемых датчиков и высокой эффективностью [15—17].

Традиционная производственная методика контроля РРИ на станках с ЧПУ. Многие металлообрабатывающие предприятия машиностроения и приборостроения комплектуют станки с ЧПУ датчиками наладки инструмента для осуществления контроля и измерения геометрических размеров РРИ. Для фрезерных станков с ЧПУ в основном применяют бесконтактные датчики наладки инструмента благодаря следующим их преимуществам по сравнению с контактными датчиками:

- возможность работы с режущим инструментом малого размера, так как измерения производятся без оказания давления;
- возможность контроля режущего инструмента фасонной формы, а также обнаружения сколов режущих кромок сменных пластин;
- более высокая скорость измерения.

Согласно паспортным данным датчиков наладки инструмента, точность выполнения измерений составляет, как правило, 1...5 мкм с повторяемостью результатов 1—2 мкм [18].

Производственную методику измерения геометрических размеров инструмента можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1 (здесь УП — управляющая программа) [18, 19].

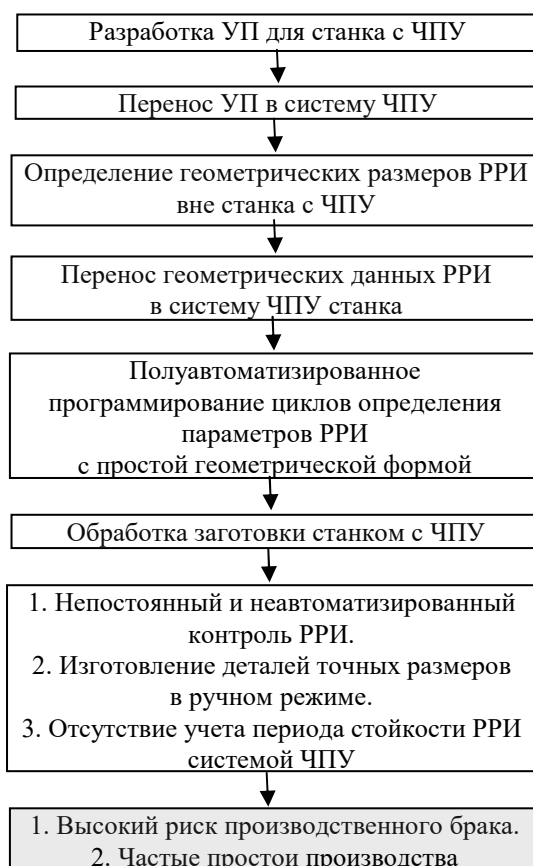


Рис. 1

Для функционирования датчика наладки инструмента необходима программа (цикл измерения), разрабатываемая на специальном языке макрокоманд, поддерживаемых конкретной системой управления станка с ЧПУ. Цикл измерения содержит параметры инструмента, значения которых в основном вводятся вручную через систему ЧПУ станка [20].

Так как программирование циклов измерений для некоторых типов РРИ является сложным и требует подстановки необходимых значений параметров, то для определения износа РРИ датчики наладки, как правило, не используются, а используются только для определения его нулевых точек перед запуском управляющей программы обработки. При этом следует отметить, что цикл измерения при функционировании по подобной схеме запускается один раз и контроль износа РРИ не производится. Также алгоритм функционирования датчика наладки инструмента „не посылает“ на станок с ЧПУ конкретные команды управления, обеспечивающие его автоматическую адаптацию к изменению технологических характеристик обработки (рис. 2).

В результате состояние РРИ не определяется автоматически, а устанавливается косвенно, что требует вмешательства специалистов для отладки технологической системы. Возможными последствиями неавтоматизированного контроля являются как простои оборудования, так и высокий риск производственного брака, вызванные неполной автоматизацией процесса технологической подготовки производства.

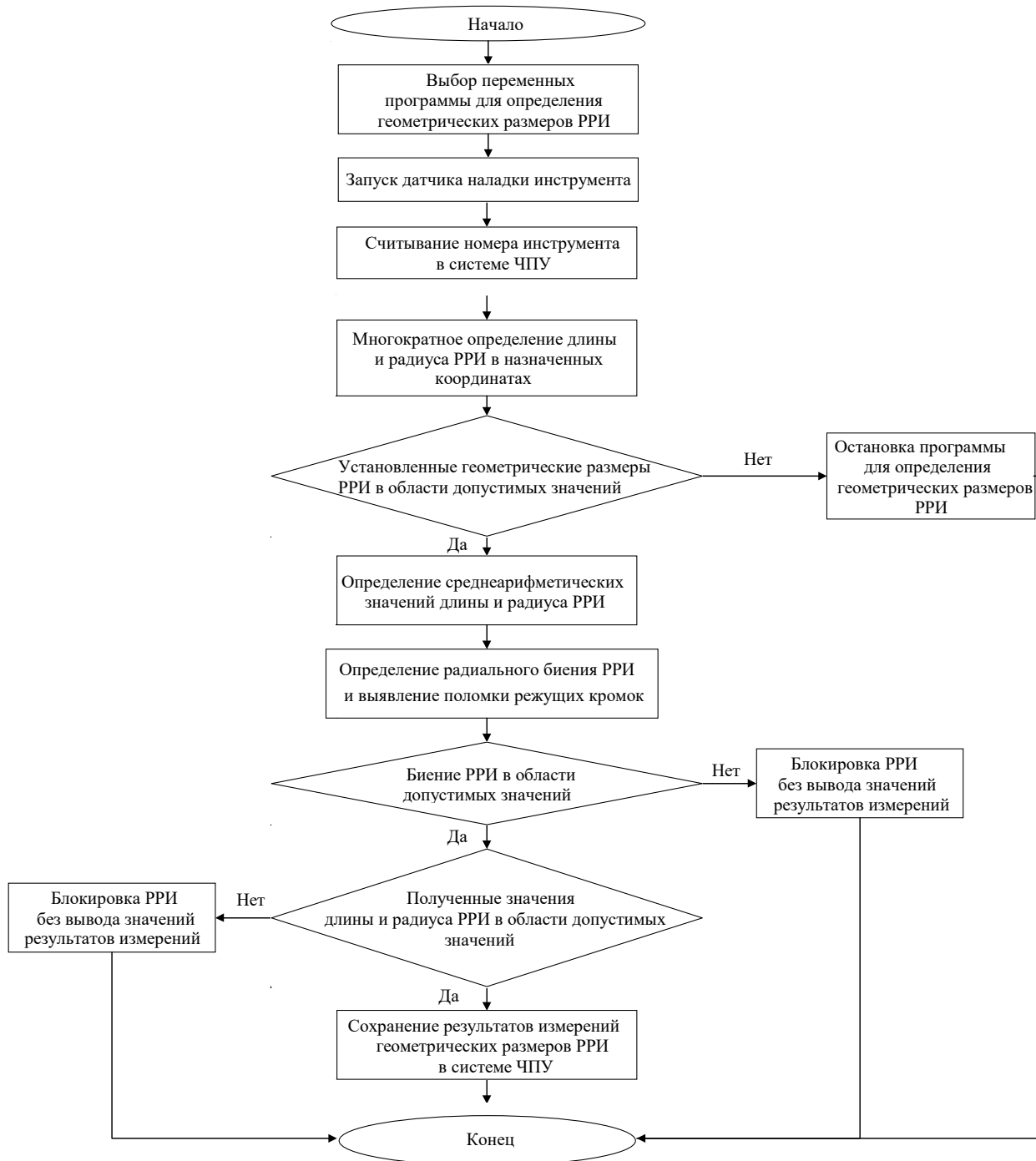


Рис. 2

Сложности при программировании цикла измерения. Значения параметров РРИ в каждом цикле измерения влияют на результаты измерений, выполняемых датчиком наладки, а следовательно, на размеры изготавливаемой детали, поэтому должны быть подобраны индивидуально в зависимости от конкретного инструмента и цели измерения. Основными параметрами инструмента являются: радиус (диаметр) инструмента, радиус режущей кромки, допустимые значения износа инструмента, количество режущих кромок, координаты точек измерения геометрических размеров РРИ в радиальном и осевом положении луча лазера (в настоящей статье обозначены как P_x и P_z соответственно) и пр.

На данный момент многие приложения для автоматизации программирования датчиков наладки инструмента имеют следующие недочеты:

— ручной ввод данных;

- невозможность редактирования значений параметров, заложенных по умолчанию;
- отсутствие постоянного вывода программ для автоматической проверки РРИ.

Параметр P_z отвечает за положение луча лазера для определения радиуса РРИ и отсчитывается относительно вершины РРИ. Параметр P_x отвечает за радиальное положение луча лазера для измерения длины РРИ и, как правило, определяется относительно центра РРИ (рис. 3). Так, например, для корректного измерения радиуса (диаметра) гребенчатых резбовых фрез бесконтактным датчиком наладки инструмента значение параметра P_z должно обеспечивать попадание луча лазера на вершину режущей кромки, а именно на первую режущую кромку из-за ее более быстрого износа, чем остальные (в случае фрезерования в направлении сверху вниз относительно верхнего торца заготовки) [21]. При этом точка, в которой определяется длина резбовой фрезы должна располагаться на плоской части торца пластины (см. рис. 3) [22]. В каталогах ведущих производителей резбовых фрез не указывается значение параметра P_z , что требует его предварительного определения на прессеторе [23]. Измерения размеров РРИ со сложной геометрией на прессеторе могут быть трудоемкими и многократными.



Рис. 3

В случае запуска управляющей программы фрезерования резьбы в отверстии резбовой фрезой, длина и радиус которой были определены датчиком наладки инструмента по программе со значениями параметров P_x и P_z , отличающимися от фактических более чем на 0,1 мм, произойдет брак резьбы. Этот результат обусловлен тем, что при внесении некорректных значений параметров P_x и P_z на станке с ЧПУ будут использоваться ошибочные координаты нулевой точки РРИ, что приведет к смещению траектории его движения относительно заданной в коде управляющей программы.

Разработанная методика контроля РРИ на станках с ЧПУ. В настоящей статье под методикой операционного контроля РРИ подразумевается контроль износа инструмента посредством определения его геометрических размеров датчиком наладки инструмента в начале и в конце технологических переходов с целью адаптации оборудования с ЧПУ к изменениям технологических характеристик обработки (без постороннего вмешательства в технологическую систему). На рис. 4 представлена схема функционирования станка с ЧПУ по предлагаемой методике, включающей новые алгоритмы обработки результатов измерений датчиком наладки инструмента. Разработанные алгоритмы имеют наибольшую эффективность для горизонтальных фрезерных станков со сменными паллетами.

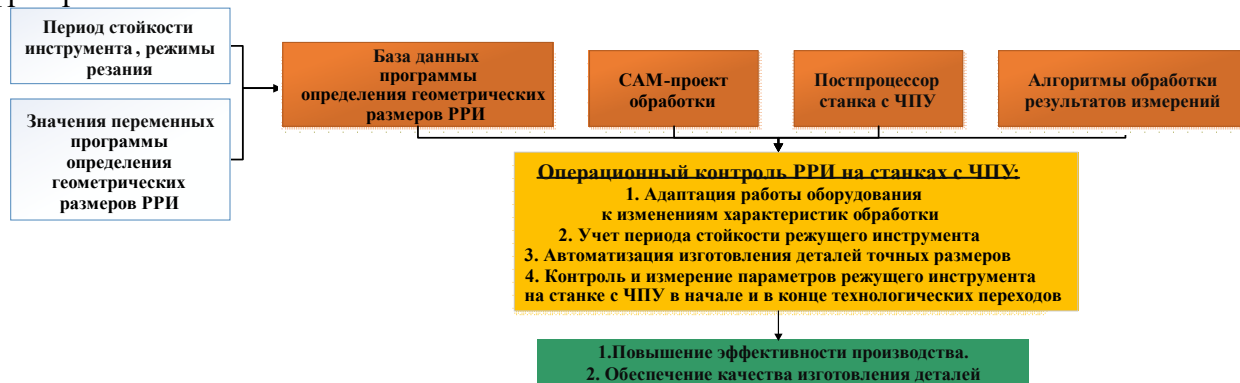


Рис. 4

Информация о технических параметрах инструмента, содержащаяся в реляционной базе данных (см. таблицу), через постпроцессор станка с ЧПУ автоматически формируется в программе определения геометрических размеров инструмента, которая вызывается по командам измерения в начале и в конце технологических переходов. В таблице (базе данных) приведены следующие данные, необходимые для программирования цикла измерения:

- номер инструментальной наладки;
- способ измерения геометрических размеров инструмента;
- координаты точек P_x и P_z ;
- допуск на износ РРИ;
- допуск на поломку РРИ;
- допуск для сравнения с прибором предварительной настройки инструмента (Δ установки) и пр.

Номер РРИ	Способ измерения	P_x	P_z	Допуск на износ РРИ, мм	Допуск на поломку РРИ, мм	Δ установки, мм	Период стойкости РРИ, мин
T1	1	0,5	0,5	0,1	0,15	0,05	150
T2	1	0,5	0,5	0,1	0,15	0,05	60

Применение базы данных сокращает процессы ручного ввода данных и подбора значений параметров, необходимых для программирования цикла измерения. Команды для вызова циклов измерений выводятся постпроцессором ЧПУ в коде управляющей программы с учетом особенностей РРИ автоматически в начале и в конце технологических переходов. В целях повышения уровня автономности оборудования с ЧПУ от оператора алгоритм функционирования датчика наладки инструмента был дополнен (рис. 5). Преимуществами расширенного алгоритма работы датчиков наладки по сравнению с исходным алгоритмом являются:

- 1) автоматическая блокировка некорректно собранной инструментальной наладки с ее заменой на дубль для запуска технологической операции;
- 2) автоматическая блокировка износившегося РРИ с его заменой на дубль для продолжения технологической операции;
- 3) автоматическая блокировка РРИ и замена его на дубль, а также вывод станочной паллеты с заготовкой из производственного цикла для дальнейшей проверки заготовки в случае поломки или чрезмерного износа РРИ после выполнения им обработки.

В результате функционирования по подобной схеме РРИ автоматически контролируется на станке с ЧПУ, а также осуществляется смещение траектории движения РРИ, указанной в управляющей программе, на сохраненное в системе ЧПУ установленное значение износа инструмента (в случае если значение не превышает предельное допустимое). Разработанные программы операционного контроля РРИ для измерения его параметров в начале и в конце технологических переходов минимизируют производственный брак, вызванный работой на фрезерном станке с ЧПУ с изношенным РРИ. За счет функционирования по разработанным программам операционного контроля РРИ обеспечивается требуемое качество изготовления деталей.

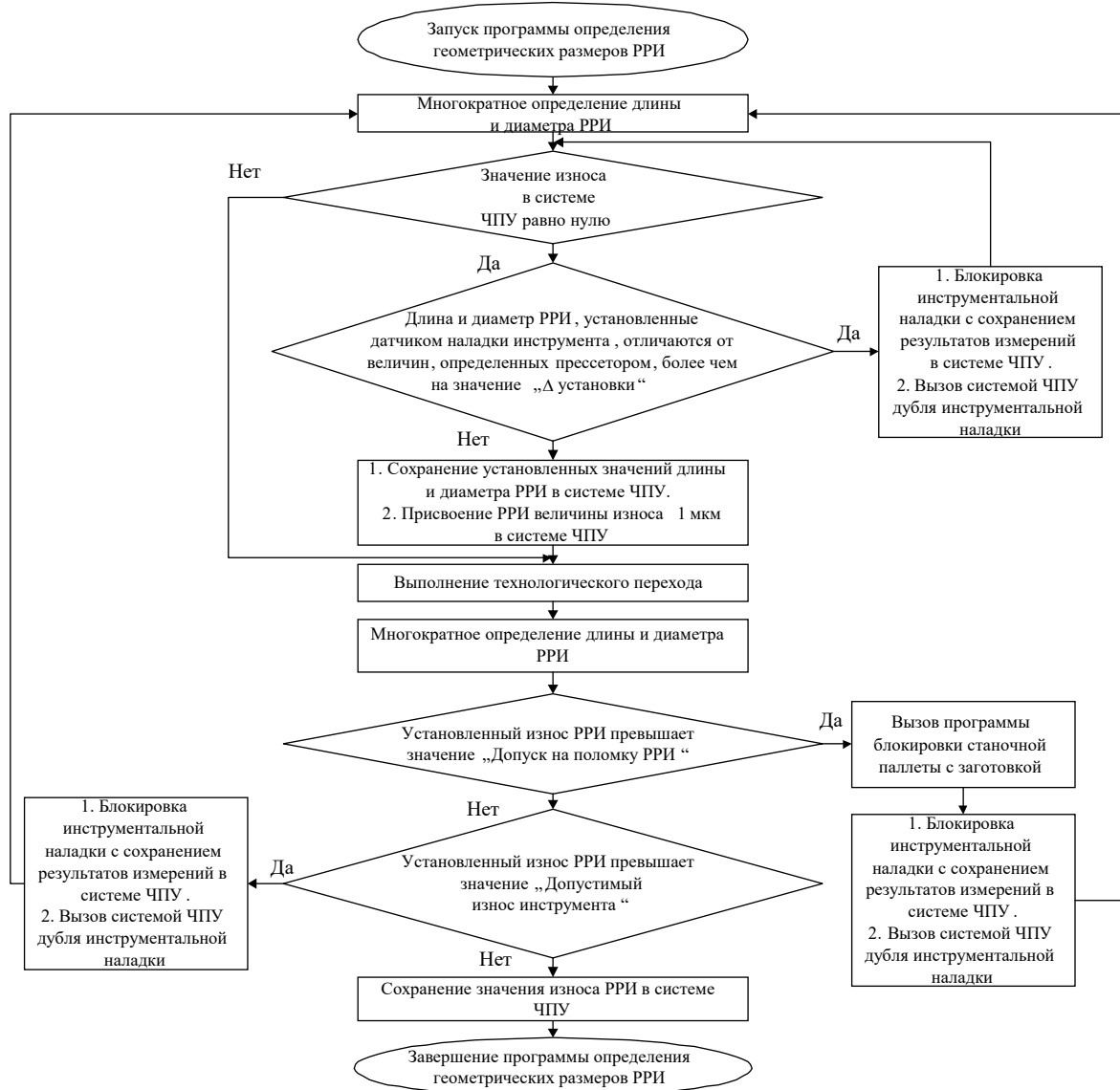


Рис. 5

Результаты внедрения предлагаемой методики. На рис. 6 представлена диаграмма, полученная на основе статистических данных, собранных с помощью системы мониторинга станков с ЧПУ „СМПО Foreman“ [24] для загрузки двух горизонтально-фрезерных обрабатывающих центров, выполнявших один заказ в течение месяца.

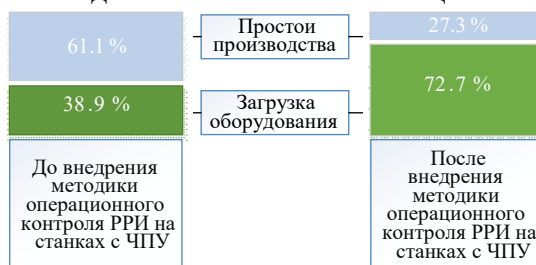


Рис. 6

Первый обрабатывающий центр функционировал с использованием производственной методики контроля РРИ, а на втором была внедрена предлагаемая методика операционного контроля РРИ. Согласно полученным статистическим данным, коэффициент загрузки оборудования был увеличен на 34 %. Также некоторые причины простоев, а именно простои, связанные с обслуживанием станка с ЧПУ (выверка/обнуление/замер РРИ), контролем детали оператором станка с ЧПУ с помощью измерительных инструментов, изготовлением элемен-

тов детали в ручном режиме на станке с ЧПУ и другими операциями, были сокращены или устранены вовсе (рис. 7).

Время простоя оборудования на основании статистических данных за 1 месяц (ч)

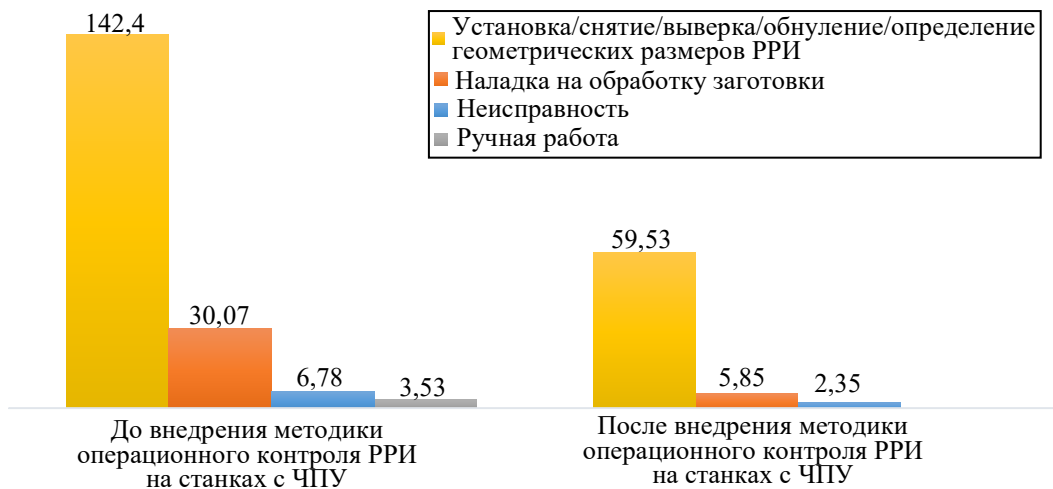


Рис. 7

Таким образом, был сделан вывод, что внедрение разработанной методики операционного контроля РРИ обеспечивает высокую эффективность производства за счет снижения простоев, а также заданное качество изготовления деталей.

Заключение. Разработана методика операционного контроля ротационного режущего инструмента, в основу которой положены считывание информации из реляционной базы данных технических параметров инструмента в течение циклов измерений, а также алгоритм обработки результатов измерений бесконтактными датчиками наладки инструмента. Применение базы данных способствует сокращению ошибок измерений геометрических размеров инструмента за счет автоматического формирования цикла измерения. Представленная методика особенно актуальна для режущего инструмента со сложной геометрической формой, как, например, у резбовых фрез. Функционирование по предлагаемой методике операционного контроля РРИ обеспечивает автоматическую адаптацию фрезерных станков с ЧПУ к изменениям некоторых технологических характеристик механической обработки; автоматизацию измерения параметров РРИ; повышение уровня автономности оборудования с ЧПУ от вмешательства оператора в технологическую систему; сокращение вероятности появления брака, вызванного работой с изношенным или сломанным РРИ, а также неверным определением координат его нулевой точки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов М. Ю., Алексеенко Д. А., Евтухов С. Н. Специальный ротационный режущий инструмент // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Серия. Машиностроение. 2012. № 33. С. 154—156.
2. Araujo A. C., Silveira J. L., Kapoor S. Force prediction in thread milling // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2004. N 26. P. 82—88.
3. Junior M. V., Baptista E. A., Araki L., Smith S., Schmitz T. The role of tool presetting in milling stability uncertainty // Procedia Manufacturing. 2018. N 26. P. 164—172.
4. Araujo A. C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy // Intern. Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. N 67. P. 28—34.
5. Benardos P. G., Vosniakos G. C. Predicting surface roughness in machining: a review // Intern. Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. N 43(8). P. 833—844.
6. Федоров В. А., Мельников Д. А., Сухарева А. А. Выбор инструмента для резбифрезерования отверстий // Научный альманах. 2017. № 2—3. С. 140—145.

7. Овсянников В. Е., Суворов А. И. К вопросу применения резьбофрезерования при обработке отверстий // Вестн. Курганского гос. ун-та. 2013. № 2 (29).
8. Rao K. V., Murthy B. S. N., Rao N. M. Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring // Measurement. 2013. N 46(10). P. 4075—4084.
9. Richter A. Breaking the beam // Cutting Tool Engineering. 2010. N 62 (4). P. 43—47.
10. Timofeev D. Yu., Khalimonenko A. D., Nacharova M. A. Preliminary local thermal impact as a surface quality assurance factor // Materials Science Forum. 2021, Vol. 1031 MSF. P. 125—131 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.125/
11. Khalimonenko A. D., Timofeev D. Y., Golikov T. S. Cutting tool for turning large workpieces // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1399(4). P. 044082. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044082.
12. Григорьев С. Н., Синональников В. А., Гурин В. Д. Особенности контактных явлений на передней поверхности режущего инструмента с износостойким покрытием при прерывистом резании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 7. С. 45—51.
13. Максимов Ю. В. и др. К вопросу об обеспечении точности обработки на станках с ЧПУ // Изв. Московского гос. техн. ун-та МАМИ. 2012. Т. 2, № 2.
14. Кочеровский Е. В., Лихцер Г. М. Диагностика состояния режущего инструмента по силовым характеристикам процесса резания: Обзор. М.: ВНИИТЭМР, 1988. Вып. 7. 40 с.
15. Wei L. Research on Tool Wear Monitoring and Turning Simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. N 576 (1). P. 122—129.
16. Zhang Y., Zhu K., Duan X., Li S. Tool wear estimation and life prognostics in milling: Model extension and generalization // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. N 155. P. 107617.
17. Ong P., Lee W. K., Lau R. J. H. Tool condition monitoring in CNC end milling using wavelet neural network based on machine vision // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. N 104(1). P. 1369—1379.
18. Reiser W. Laser system for non-contact tool setting and breakage detection // WIT Trans. on Engineering Sciences. 1970. Vol. 16.
19. Толубаев И. Н., Антипин А. П., Евстигнеев А. Д. Разработка управляющей программы изготовления направляющей в Siemens Sinumerik 840DSL // Вузовская наука в современных условиях. 2020. С. 78—80.
20. <https://www.blum-novotest.com/en/products/measuring-components/lasercontrol/micro-compact-nt.html>, 03.05.2022.
21. Júnior R. C. E., Pereira R. B. D., Lauro C. H., Brandão L. C. Research on the wear mechanisms during the high-speed tapping in 316L stainless steel // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. N 112(1). P. 419—436.
22. Fromentin G., Poulachon G. Geometrical analysis of thread milling—part 1: Evaluation of tool angles // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. N 49(1—4). P. 73—80.
23. <https://www.iscar.ru/eCatalog/item.aspx?cat=3346000&fnum=4063&mapp=IS&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>, 19.08.2022.
24. Зайцева А. Д., Ерохина Е. В. Системы мониторинга станков с числовым программным управлением как источник повышения эффективности производства // Научные исследования XXI века. 2019. № 2. С. 49—55.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|--|
| Татьяна Владимировна Басова | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: tvbasova@itmo.ru |
| Юрий Сергеевич Андреев | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: ysandreev@itmo.ru |
| Мария Владимировна Басова | — аспирант; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия; E-mail: basova_mv@voenmeh.ru |

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. Popov M.U., Alekseenko D.A., Evtukhov S.N. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2012, no. 33, pp. 154–156. (in Russ.)
2. Araujo A.C., Silveira J.L., & Kapoor S. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, vol. 26, pp. 82–88.
3. Junior M.V., Baptista E.A., Araki L., Smith S., & Schmitz T. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 164–172.
4. Araujo A.C., Fromentin G., & Poulachon G. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 67, pp. 28–34.
5. Benardos P.G., & Vosniakos G.C. *Predicting Surface Roughness in Machining: a Review. International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, no. 8(43), pp. 833–844.
6. Fedorov V.A., Melnikov D.A., Sukhareva A.A. *Scientific almanac*, 2017, no. 2–3, pp. 140–145. (in Russ.)
7. Ovsyannikov V.E., Suvorov A.I. *Bulletin of Kurgan State University*, 2013, no. 2(29). (in Russ.)
8. Rao K.V., Murthy B.S.N., & Rao N.M. *Measurement*, 2013, no. 10(46), pp. 4075–4084.
9. Richter A. *Breaking the beam. Cutting Tool Engineering*, 2010, no. 4(62), pp. 43–47.
10. Timofeev D.Yu., Khalimonenko A.D., Nacharova M.A. *Preliminary local thermal impact as a surface quality assurance factor. Materials Science Forum*, 2021, Vol. 1031 MSF, pp. 125–131, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.125.
11. Khalimonenko A.D., Timofeev D.Y., Golikov T.S. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 4(1399), pp. 044082, DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044082.
12. Grigoriev S.N., Sinonolnikov V.A., Gurin V.D. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya* (Hardening Technologies and Coatings) 2007, no. 7, pp. 45–51. (in Russ.)
13. Maksimov Y.V., Porkhunov S.G., Kuzminskiy D.L. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2012, no. 2(2), pp. 98–104. (in Russ.)
14. Kocherovsky E.V., Likhtser G.M. *Diagnostika sostoyaniya rezhushchego instrumenta po silovym kharakteristikam protsessa rezaniya* (Diagnostics of the State of the Cutting Tool by the Power Characteristics of the Cutting Process), Moscow, 1988, no. 7, pp. 40. (in Russ.)
15. Wei L. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 1(576), pp. 122–129.
16. Zhang Y., Zhu K., Duan X., & Li S. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 155, p. 107617.
17. Ong P., Lee W.K., & Lau R.J.H. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, no. 1(104), pp. 1369–1379.
18. Reiser W. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 1970, vol. 16.
19. Tolubaev I.N., Antipin A.P., Evstigneev A.D. *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh* (University Science in Modern Conditions), 2020, pp. 78–80. (in Russ.)
20. <https://www.blum-novotest.com/en/products/measuring-components/lasercontrol/micro-compact-nt.html>.
21. Júnior R.C.E., Pereira R.B.D., Lauro C.H., & Brandão L.C. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, no. 1(112), pp. 419–436.
22. Fromentin G., & Poulachon G. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, no. 1–4(49), pp. 73–80.
23. <https://www.iscar.ru/eCatalog/item.aspx?cat=3346000&fnum=4063&mapp=IS&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>.
24. Zaitseva A.D., Erokhina E.V. *Scientific Research of the 21st Century*, 2019, no. 2, pp. 49–55. (in Russ.)

Data on authors

- Tatiana V. Basova** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: tvbasova@itmo.ru
- Yuriy S. Andreev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: ysandreev@itmo.ru
- Maria V. Basova** — Post-Graduate Student; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH,
Department of Small-Gun, Artillery and Rocket Weapons;
E-mail: basova_mv@voenmeh.ru

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ДЕТАЛЕЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ**С. А. ЮДИН^{1*}, Р. М. ИСАЕВ²¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* sayudin@itmo.ru

² Техприбор, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматриваются технологические особенности изготовления пьезоэлектрические датчиков вибрации, наиболее часто используемых для измерения механических колебаний. Приведена конструкция пьезоэлектрического датчика вибрации и определены его ключевые характеристики, рассмотрены требования к шероховатости поверхности и допуску плоскостности и параллельности. Проведен анализ исследований, посвященных технологическим вопросам изготовления пьезоэлектрических датчиков вибрации. Показана необходимость разработки методики по определению рациональных технологических режимов доводочной операции.

Ключевые слова: пьезоэлектрик, пьезоэлемент, шероховатость, вибрация, пьезоэлектрический датчик вибрации, вибропреобразователь, допуск плоскостности, допуск параллельности, относительный коэффициент поперечного преобразования, шлифование, доводка

Ссылка для цитирования: Юдин С. А., Исаев Р. М. Технологические особенности обработки поверхностей деталей пьезоэлектрического датчика вибрации // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 66—73. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-66-73.

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF SURFACE TREATMENT
OF A PIEZOELECTRIC VIBRATION SENSOR PARTS**S. A. Yudin^{1*}, R. M. Isaev²¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

sayudin@itmo.ru

² JSC Techpribor, St. Petersburg, Russia

Abstract. Technological features of manufacturing piezoelectric vibration sensors, most often used to measure mechanical vibrations, are considered. Design of a piezoelectric vibration sensor is presented and its key characteristics are determined, the requirements for surface roughness and tolerance of flatness and parallelism are described. An analysis of studies on the technological issues of manufacturing piezoelectric vibration sensors is carried out. The necessity of development of a technique for determining rational technological modes of finishing operation is demonstrated.

Keywords: piezoelectric, piezoelectric element, roughness, vibration, piezoelectric vibration sensor, vibration transducer, flatness tolerance, parallelism tolerance, relative coefficient of transverse transformation, grinding, fine-tuning

For citation: Yudin S. A., Isaev R. M. Technological features of surface treatment of a piezoelectric vibration sensor parts. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 66—73 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-66-73.

Исследованию колебаний уделяется большое внимание при разработке, испытании и эксплуатации разнообразных технических и технологических устройств в энергетике, машиностроении, металлургии, авиационной и ракетно-космической технике, судостроении и т.д. [1—3]. С помощью измерения вибраций решаются, в том числе, вопросы, связанные с повышением надежности и безопасности техники.

На данный момент широко распространены измерительно-информационные системы вибрационного контроля, мониторинга и диагностики, которые способствуют предотвращению

аварий и поломок сложных технических устройств. Начальным звеном таких систем являются датчики параметров вибрационных и ударных колебаний, установленные непосредственно на контролируемом объекте и осуществляющие преобразования измеряемой механической величины в электрический сигнал, поступающий на регистрирующее устройство. Такие датчики, как правило, работают при высоких температурах, сильных переменных полях, интенсивных вибрационных и ударных нагрузках, высоких давлениях и т.д. В связи с этим к датчикам вибрации предъявляются особые требования по точности, надежности и стабильности метрологических характеристик.

Среди существующих типов датчиков для измерения механических колебаний следует отметить пьезоэлектрические датчики вибрации (ПДВ) [1]. При разработке и модернизации этих датчиков особое внимание уделяется изменению конструкции, что приводит к ужесточению требований к шероховатости поверхностей и геометрической точности деталей, входящих в состав датчика.

Конструкция многих ПДВ похожа [4—6]. Основание корпуса используется для установки и крепления датчика на объекте измерения, кожух корпуса предназначен для его защиты от механических повреждений, а также уменьшения воздействия внешних электромагнитных полей. Блок пьзоэлементов преобразует механические колебания в пропорциональный электрический сигнал. Съем сигнала с ПДВ и коммутация с измерительной аппаратурой осуществляются с помощью экранированного кабеля. При этом стоит отметить, что все разъемы и соединения герметизированы. В конструкции датчика отсутствуют подвижные элементы, что позволяет исключить возможность износа и гарантирует долговечность датчика. Конструкция ПДВ определяется типом деформации пьзоэлементов. Различают датчики с пьзоэлементами, работающими на растяжение-сжатие [7], изгиб [8] и сдвиг [9].

Конструкция рассматриваемого пьезоэлектрического датчика вибрации с компрессионным вибропреобразователем с упругим поджатием (рис. 1) предполагает сопряжение между собой следующих деталей и сборочных единиц: стойка, основание 2, шайба 3, груз 4, прокладка 5, гайка 6 и блок пьзоэлементов 1. Блок пьзоэлементов, в свою очередь, состоит из пьезоэлектрических шайб и токопроводных шайб. Пьезоэлектрическая шайба выполнена из цирконата-титаната свинца, являющегося сегнетоэлектриком.

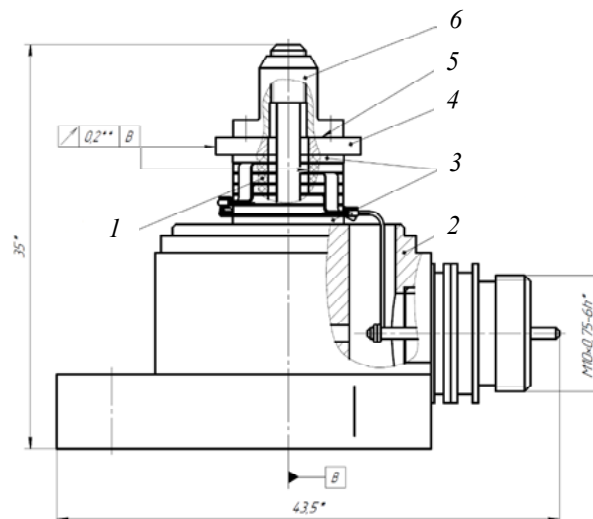


Рис. 1

Работоспособность, точность и применимость ПДВ оценивается по более чем 40 параметрам [4]. Технические характеристики ПДВ зависят от трех основных составляющих: используемой схемы вибропреобразователя, состава пьезокерамического материала и условий закрепления датчика на контролируемом объекте измерений, что, в том числе, связано с геометрической точностью деталей. Указанные характеристики определяют точность результатов

измерений параметров вибрационного ускорения и определяют область применения конкретного ПДВ.

Основными техническими характеристиками ПДВ являются (согласно ГОСТ 30296-95):

- коэффициенты преобразования по заряду и напряжению, отвечающие за минимальный уровень измеряемого вибрационного ускорения;
- частота установочного резонанса, которая определяет верхнюю границу рабочего диапазона частот при заданной погрешности измерения;
- диапазон рабочих частот;
- предельное рабочее вибрационное ускорение;
- неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в рабочем диапазоне частот;
- относительный коэффициент поперечного преобразования (ОКПП), влияющий на основную погрешность измерения вибрационного ускорения;
- нелинейность АЧХ в рабочем диапазоне ускорений;
- рабочий диапазон температур;
- масса и габаритные размеры;
- способ крепления к поверхности контролируемого объекта;
- защищенность от воздействия окружающей среды и источников помех.

Для ПДВ также важны такие характеристики, как стабильность измерений во времени и устойчивость к воздействию внешних факторов, поскольку в неподходящих условиях эксплуатации возможны обратимые и необратимые изменения коэффициентов преобразования и других характеристик. Данная особенность естественным образом ограничивает применимость ПДВ и является одним из их серьезных недостатков.

ОКПП характеризует боковую чувствительность датчика и определяется как отношение максимального значения сигнала, возникающего под действием ускорения, направленного перпендикулярно рабочей оси акселерометра, к значению сигнала, измеренному под действием того же ускорения вдоль рабочей оси датчика, этот коэффициент выражается в процентах. Следовательно, точность датчика зависит от расположения блока пьезоэлементов относительно поверхности контролируемого объекта. Ось чувствительности датчика должна быть перпендикулярна плоскости основания. В связи с этим к сопрягаемым поверхностям деталей датчика предъявляются требования к параметру шероховатости R_a не более 0,4 мкм (среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины (согласно ГОСТ 2789-73)). Единственной контактной поверхностью, шероховатость которой более грубая и равна R_a 0,8, является нижняя установочная поверхность детали „основание“. При этом стоит отметить, что обеспечение заданного значения шероховатости поверхностей не гарантирует получения необходимых эксплуатационных свойств поверхности [10].

Помимо требований к шероховатости поверхности, также выдвигаются требования к геометрической точности деталей в виде допусков формы и расположения, таких как допуск параллельности, допуск плоскостности и допуск перпендикулярности. В зависимости от детали требования к допуску параллельности лежат в интервале от 0,005 до 0,05 мм, к допуску плоскостности — в интервале от 0,003 до 0,01 мм, к допуску перпендикулярности — 0,05 мм (см. табл. 1). При этом допуски на размеры регламентированы 12-м квалитетом.

Таблица 1

Наименование	Плоскостность, мм	Параллельность, мм	Интервал квалитетов	Шероховатость, мкм
Основание	0,003	0,05	От 7 до 14	R_a 0,4
Шайба	0,003	0,005	От 12 до 14	R_a 0,8
Груз	0,003	0,005	От 11 до 12	R_a 0,4
Гайка	0,003	—	От 6 до 14	R_a 0,4

Технические характеристики ПДВ зависят от множества факторов, большинство из которых относятся к конструкции, из чего следует, что достичь требуемого значения выбранной характеристики ПДВ можно, лишь внося изменения в его конструкцию. При этом качество изготовления пьезоэлемента, деталей и сборки вибропреобразователя, т.е. технологический фактор, влияет на ОКПП. Следовательно, при разработке технологического процесса изготовления деталей из состава вибропреобразователя необходимо учитывать требования к ОКПП, что для рассматриваемого датчика соответствует не более 5 %. Данный фактор учитывается в конструкторской документации на чертеж путем введения требования по обеспечению заданной шероховатости поверхности посредством операции доводки, которая, в свою очередь, является трудоемким процессом.

Согласно утвержденной серийной технологической документации, итоговая шероховатость поверхностей и точность формы изготавливаемых деталей достигаются шлифованием и последующей доводкой на плоскодоводочном автомате двустороннего действия — оба эти технологических метода являются подвидами абразивной обработки (см. ГОСТ 23505-79).

Шлифование производится абразивными кругами из карбида кремния. На уменьшение шероховатости поверхности при шлифовании влияют следующие параметры: выхаживание, правка круга, скорость шлифования, зернистость круга, режимы резания, материал связки, химический состав смазочно-охлаждающей жидкости [11] — параметры перечислены в порядке возрастания степени их влияния на получаемую шероховатость поверхности. При этом при неправильно подобранных режимах в процессе резания возможен перегрев обрабатываемой поверхности заготовки, что, в свою очередь, приведет к образованию шлифовочных прижогов и микротрещин. Результатом прижогов являются напряжения растяжения в поверхностном слое заготовки, которые в совокупности с микротрещинами вызывают ускоренный износ и разрушение деталей в процессе эксплуатации [12].

Доводка на плоскодоводочном автомате двустороннего действия предполагает простое движение шлифовальных кругов, заключающееся во вращении по часовой стрелке или против часовой, и сложное движение заготовок посредством их вращения вокруг собственной оси и оси станка.

Первоначально изготовителем этого автомата предполагалось использование чугунных кругов с подмешиванием абразивной смеси в процессе доводки. Применение доводочных кругов с уже нанесенным абразивом привело, с одной стороны, к автоматизации операции доводки, а с другой — к необходимости регулярной правки доводочных кругов на шлифовальных автоматах и полуавтоматах. Метод правки доводочных кругов, предложенный производителем автомата, заключается в запуске цикла доводки с помещением специальной шарошки между чугунными кругами. Это связано с недостаточной для срезания алмазного слоя скоростью вращения шарошки. Следовательно, модификация станка привела к дополнительным капитальным затратам в виде регулярной отправки доводочных кругов на правку либо приобретения шлифовального автомата.

На примере детали „основание“ из состава ПДВ в работе [13] подтверждается применение операции доводки, а на основании источников [10, 14—19] сделан вывод о необходимости использования более информативных критериев оценки и контроля оптимизации микрогеометрии поверхности, чем параметрические показатели R_a и R_z , что указывает на необходимость использования графических критериев шероховатости. Это определяется тем, что параметрические критерии шероховатости поверхности при одном и том же значении, но разных методах обработки или режущих инструментах обусловлены различными функциональными свойствами поверхности.

Для подтверждения данного суждения авторами настоящей статьи были изготовлены образцы методом точения, фрезерования и доводки с заданным значением R_a , равным 0,1 мкм,

и получены следующие значения ОКПП: 3,1, более 5 и 2,4 % соответственно. Данный эксперимент подтверждает несовершенство интегрального параметра R_a .

Согласно представленной в работе [20] методике, также были изготовлены образцы методом точения и подтверждена зависимость между шероховатостью и ОКПП в целом. Для получения графического критерия шероховатости при планировании эксперимента и анализе результатов использовался метод Тагути, согласно которому в качестве факторов выделены следующие параметры: подача, глубина резания, скорость резания и угол при вершине резца. Из результатов эксперимента следует, что параметры R_p (максимальная высота выступа) и R_{ku} (эксцесс, используемый для определения угла наклона поверхностей), отвечающие за пиковые значения шероховатости и островершинность соответственно, являются определяющими факторами при определении режимов резания методом токарной обработки для получения заданного значения ОКПП. Следует отметить, что для апробации методики и получения графического критерия в работе [22] применялась исключительно технология токарной обработки.

Для определения рациональных режимов токарной обработки в работе [20] представлен эталон шероховатости поверхности, по которому следует контролировать шероховатость, и приведены графики, содержащие практически полную информацию об угловых и высотных характеристиках профиля. Анализ эталона показывает, что в профиле поверхности количество выступов и впадин равнозначно.

На основании полученных режимов токарной обработки и эталона шероховатости поверхности в работе [13] представлен технологический процесс изготовления детали „основание“ на обрабатывающем центре с ЧПУ WILLEMIN-MACODEL 508MT. Внедрение данного технологического процесса позволило снизить трудоемкость изготовления партии деталей (100 штук) в 1,4 раза. При этом следует отметить, что при обработке необходимо выполнить подрезку торца технологической оснастки на станке перед началом обработки новой партии деталей в целях обеспечения заданного допуска параллельности поверхностей.

Используемые технологические режимы обработки, например для детали „основание“, заключаются в двух циклах обработки при усилии прижима в 392 Н·м (40 кгс) в течение 40 мин каждый. Обработка осуществляется между двумя доводочными кругами с алмазным режущим слоем фракции 7/5 и 60/40 для верхней и нижней поверхностей деталей соответственно.

Для измерения фактических значений шероховатости поверхностей и допуска формы и расположения были изготовлены десять образцов из сплава 12X18H10T согласно режимам, заданным действующим технологическим процессом. Для изготовления опытных образцов были выполнены следующие технологические операции: отрезка, точение, шлифование, доводка. Для отрезки использован ленточнопильный станок ARG 130, для выполнения точения — токарно-револьверный станок Р-16, для плоской шлифовки — плоскошлифовальный станок 3Б722, для доводки — плоскодоводочный автомат ПД2С-905.

Технология доводки предполагает выполнение следующих основных действий:

- 1) установка верхнего и нижнего доводочных кругов и их протирка;
- 2) установка сепараторов на нижний доводочный круг;
- 3) установка заготовок в гнезда сепаратора;
- 4) подведение верхнего доводочного круга в рабочую зону и подача давления;
- 5) запуск двигателя и начало доводки;
- 6) выполнение циклов обработки согласно установленным режимам;
- 7) остановка двигателя с отводом верхнего круга;
- 8) изъятие заготовок из сепараторов и промывка.

Далее были измерены фактические значения шероховатости и допуски плоскостности на контактных поверхностях 1 и 2 детали „основание“ (рис. 2); результаты измерений представлены в табл. 2.

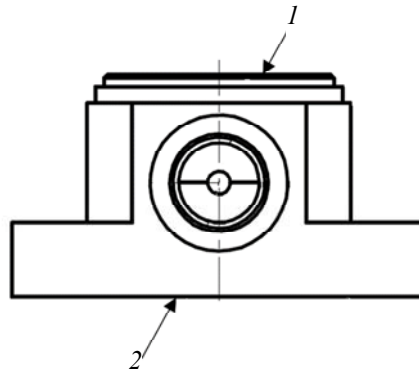


Рис. 2

Таблица 2

Условный номер поверхности	Шероховатость, мкм, среднее значение		Плоскостность, мм, среднее значение	
	заданное	фактическое	заданное	фактическое
1	Ra 0,4	Ra 0,03	0,003	0,001
2	Ra 0,8	Ra 0,05	0,01	0,002

На основе анализа приведенных в таблице результатов можно сделать вывод о нерациональности используемых технологических режимов обработки для доводочной операции. Следовательно, можно предположить фактически меньший экономический эффект и снижение эффективности производственного цикла по технологическому процессу, представленному в работе [13].

По результатам проведенной работы можно сделать вывод о необходимости проведения исследований в области поиска рациональных режимов доводочной операции и разработки соответствующей методики. Подтвержденная малоинформативность параметрического критерия шероховатости Ra, а также возможность применения графического критерия шероховатости путем использования эталонов обуславливают необходимость проверки применимости методов оценивания топографии поверхности и трехмерных параметров оценки шероховатости с целью регламентации требований к геометрической точности деталей ПДВ с заданным значением ОКПП. Также следует исследовать степень влияния шероховатости поверхности остальных деталей пьезоэлектрического датчика вибрации на ОКПП и прочие характеристики датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение и анализ механических колебаний / Технический центр Компании Брюль и Кьер. М., 2007. 41 с.
2. Шаранов В. М., Мусиенко М. П., Шаранова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
3. Киселев Ю. В., Киселев Д. Ю., Тиц С. Н. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники. Самара: СГАУ, 2012. 207 с.
4. Янчин В. В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учеб. пособие. Ростов-н/Д: ЮФУ, 2008. 77 с.
5. Головин В. А., Каплунов И. А., Малышкина О. В. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. М.: Техносфера, 2016. 272 с.
6. А. с. 361723 СССР, МКИ G01P15/08. Пьезоэлектрический акселерометр / О. П. Крамаров. 1975.
7. Пат. 2150117 РФ, G01P15/09. Пьезоэлектрический акселерометр / Ю. С. Вусевкер, А. В. Гориши, В. П. Дунаевский, А. Е. Панич. Опубл. 27.05.2000.

8. Пат. 418800 СССР, G01P15/09. Пьезоэлектрический акселерометр / В. П. Дунаевский, И. Ф. Калужная, Н. Т. Федорова. Оpubл. 05.03.1974.
9. Пат. 45704 Украина, G01P15/09. Пьезоэлектрический акселерометр / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, С. В. Роттэ и др. Оpubл. 15.04.2002.
10. Валетов В. А., Юльметова О. Ю. Микрогеометрия поверхности и ее функциональные свойства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 48. С. 140—142.
11. Яцерицын П. И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1966. 384 с.
12. Кремень З. И., Юрьев В. Г., Бабошкин А. Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб: Политехника, 2007. 425 с.
13. Исаев Р. М. Влияние качества поверхностей функциональных деталей пьезоэлектрических датчиков вибрации на их эксплуатационные характеристики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2017.
14. Валетов В. А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности // Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении: Сб. Л.: ЛКИ, 1978. С. 62—65.
15. Валетов В. А., Андреев Ю. С., Цимбал И. Р. Исследование микрогеометрии трущихся поверхностей // Трибология и надежность: Сб. СПб, 2010. С. 85—92.
16. Лишник Ю. В., Хусу А. П. Математико-статистическое описание неровностей профиля поверхности при шлифовании. М.: Изд-во АН СССР, 1954.
17. Маталин А. А. Шероховатость поверхности деталей в приборостроении. М.: Машгиз, 1949.
18. Шлезингер Г. Качество поверхности. М.: Машгиз, 1947. 284 с.
19. Хусу А. П., Виттенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей. М.: Наука, 1975. 344 с.
20. Isaev R. M., Andeev Y. S., Vasilkov S. D. Effect of method for treatment of the functional surface of a piezoelectric vibration sensor on its sensitivity // Procedia Engineering. 2017. Vol. 176. P. 96—106.

Сведения об авторах

- Семен Алексеевич Юдин** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: sayudin@itmo.ru
- Расим Мирмагмудович Исаев** — канд. техн. наук; Техприбор, служба главного технолога; начальник отдела; E-mail: ras_man@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. *Izmereniye i analiz mekhanicheskikh kolebaniy. Tekhnicheskij Tsentr Kompanii Bryul' i K"yer* (Measurement and Analysis of Mechanical Vibrations. Brüel & Kjær Technical Center), Moscow, 2007, 41 p. (in Russ.)
2. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'yezoelektricheskiye datchiki* (Piezoelectric Sensors), Moscow, 2006, 632 p. (in Russ.)
3. Kiselev Yu.V., Kiselev D.Yu., Tits S.N. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruktivnyy aviatcionnoy tekhniki* (Vibration Diagnostics of Systems and Structures of Aviation Equipment), Samara, 2012, 207 p. (in Russ.)
4. Yanchin V.V. *P'yezoelektricheskiye datchiki vibratsionnogo i udarnogo uskoreniya* (Piezoelectric Vibration and Shock Acceleration Sensors), Rostov-on-Don, 2008, 77 p. (in Russ.)
5. Golovin V.A., Kaplunov I.A., Malyshkina O.V. *Fizicheskiye osnovy, metody issledovaniya i prakticheskoye primeneniye p'yezomaterialov* (Physical Foundations, Research Methods and Practical Application of Piezomaterials), Moscow, 2016, 272 p. (in Russ.)
6. Certificate of authorship 361723 (USSR), G01P15/08, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), O.P. Kramarov, 1975. (in Russ.)
7. Patent RU 2150117, G01P15/09, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), Yu.S. Vusevker, A.V. Gorish, V.P. Dunaevsky, A.E. Panic, Published 27.05.2000. (in Russ.)
8. Patent USSR 418800, G01P15/09, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), V.P. Dunaevsky, I.F. Kalyuzhnaya, N.T. Fedorova, Published 05.03.74. (in Russ.)
9. Patent UA 45704, G01P15/09, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), V.M. Sharapov, M.P. Musienko, S.V. Rotte et al., Published 15.04.2002. (in Russ.)
10. Valetov V.A., Yulmetova O.Yu. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2008, no. 48, pp. 140—142. (in Russ.)

11. Yascheritsyn P.I. *Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv shlifovannykh poverkhnostey* (Improving the Performance Properties of Polished Surfaces), Minsk, 1966, 384 p. (in Russ.)
12. Kremen Z.I., Yuriev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroyenii* (Grinding Technology in Mechanical Engineering), St. Petersburg, 2007, 425 p. (in Russ.)
13. Isaev R.M. *Vliyaniye kachestva poverkhnostey funktsional'nykh detaley p'yezoelektricheskikh datchikov vibratsii na ikh ekspluatatsionnyye kharakteristiki* (Influence of Surface Quality of Functional Parts of Piezoelectric Vibration Sensors on Their Operational Characteristics), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2017, http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=E023BAE9C97B17E23B203506C0E74B33. (in Russ.)
14. Valetov V.A. *Tekhnologiya korpusostroyeniya, sudovogo mashinostroyeniya i svarki v sudostroyenii* (Technology of Hull Building, Ship Engineering and Welding in Shipbuilding), Leningrad, 1978, pp. 62–65. (in Russ.)
15. Valetov V.A., Andreev Yu.S., Tsimbal I.R. *Tribologiya i nadezhnost'* (Tribology and Reliability), St. Petersburg, 2010, pp. 85–92. (in Russ.)
16. Lishnik Yu.V., Khusu A.P. *Matematiko-statisticheskoye opisaniye nerovnostey profilya poverkhnosti pri shlifovanii* (Mathematical and Statistical Description of Surface Profile Irregularities During Grinding), Moscow, 1954. (in Russ.)
17. Matalin A.A. *Sherokhovatost' poverkhnosti detaley v priborostroyenii* (Surface Roughness of Parts in Instrumentation), Moscow, 1949.
18. Schlesinger G. *Kachestvo poverkhnosti* (Surface Quality), Moscow, 1947, 284 p. (in Russ.)
19. Khusu A.P., Wittenberg Yu.R., Palmov V.A. *Sherokhovatost' poverkhnostey* (Surface Roughness), Moscow, 1975, 344 p. (in Russ.)
20. Isaev R.M., Andeev Y.S., Vasilkov S.D. *Procedia Engineering*, Elsevier, 2017, vol. 176, pp. 96–106.

Data on authors

- Semyon A. Yudin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: sayudin@itmo.ru
- Rasim M. Isaev** — PhD; JSC Techpribor, Chief Technologist Service; Head of the Department;
E-mail: ras_man@mail.ru

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ**

О. А. Колганов*, А. В. Ильинский, Р. А. Егоров, А. Е. Хошев, А. В. Федоров

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия***kolganoff2014@yandex.ru*

Аннотация. Рассматривается возможность применения магнитоиндукционного метода с дифференциальным включением двух катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании. На основе анализа литературы по неразрушающему контролю механических характеристик материалов обосновано применение метода динамического индентирования как перспективного направления в данной области. Разработан прототип первичного преобразователя датчика динамического индентирования, отличительной особенностью которого является применение в нем двух дифференциально включенных катушек индуктивности. Для обоснования работоспособности первичного преобразователя разработана компьютерная 3D-модель регистрации движения ударника при пролете в программе конечно-элементного анализа Comsol Multiphysics, с помощью которого проанализировано влияние изменения геометрических параметров дифференциально включенных катушек индуктивности на изменение ЭДС от времени. Приведены результаты экспериментальной отработки прототипа датчика динамического индентирования. Предложенная схема реализации магнитоиндукционного метода позволяет существенно снизить зависимость получаемого сигнала ЭДС от взаиморасположения магнита и катушек индуктивности, что, в свою очередь, позволяет повысить точность регистрации параметров движения индентора.

Ключевые слова: динамическое индентирование, контактно-ударное взаимодействие, система регистрации, параметры движения, магнитоиндукционный метод, катушка, магнит

Ссылка для цитирования: Колганов О. А., Ильинский А. В., Егоров Р. А., Хошев А. Е., Федоров А. В. Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 74—80. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-74-80.

**DIFFERENTIAL CONNECTION OF INDUCTANCE COILS
FOR RECORDING THE PARAMETERS OF STRIKER MOTION
DURING DYNAMIC INDENTATION**

O. A. Kolganov*, A. V. Ilyinsky, R. A. Egorov, A. E. Khoshev, A. V. Fedorov

*ITMO University, St. Petersburg, Russia***kolganoff2014@yandex.ru*

Abstract. The possibility of using the magnetic induction method with the differential inclusion of two inductors for recording the motion parameters of the impactor during dynamic indentation is considered. Based on analysis of the literature on non-destructive testing of the mechanical characteristics of materials, the use of the dynamic indentation method as a promising direction in this area is substantiated. A prototype of the primary transducer of the dynamic indentation sensor is developed, the distinctive feature of the prototype is the use of two differentially connected inductors in it. To demonstrate the primary converter operability, a computer 3D model is developed for registering the impactor movement during the flight in the Comsol Multiphysics finite-element analysis program, with the help of which the effect of variation of geometric parameters of differentially connected inductors on the change in EMF with time is analyzed. Results of experimental testing of the dynamic indentation sensor prototype are presented. The proposed scheme for implementing the magnetic induction method makes it possible to significantly reduce the dependence of the obtained EMF signal on the relative position of the magnet and inductors, which, in turn, ensures the possibility to increase the accuracy of recording the indenter motion parameters.

Keywords: dynamic indentation, contact-impact interaction, registration system, motion parameters, magnetoinduction method, coil, magnet

For citation: Kolganov O. A., Ilyinsky A. V., Egorov R. A., Khoshev A. E., Fedorov A. V. Differential connection of inductance coils for recording the parameters of striker motion during dynamic indentation. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 74—80 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-74-80.

Введение. В настоящее время в различных отраслях промышленности предъявляются все более высокие требования к механическим свойствам материалов изделий. При решении задач неразрушающего контроля (НК) механических свойств материалов изделий и их составных частей на этапах производства, испытаний и эксплуатации широкое применение находят безобразцовые методы, реализуемые портативными приборами. Один из перспективных методов безобразцового контроля — динамическое индентирование. Данный метод позволяет проводить безобразцовый контроль не только твердости материала, но и других его свойств (прочность, упругость и др.). При этом возможно проведение НК с использованием динамического индентирования как металлов, так и низкомодульных полимеров и композиционных материалов.

Метод динамического индентирования. Основа реализации метода динамического индентирования заключается в регистрации параметров движения индентора в процессе его контактного ударного взаимодействия (КУВ) с исследуемым материалом. Применение данного метода регламентируется ГОСТ Р 56474-2015. В процессе КУВ ударник, представляющий собой индентор, жестко закрепленный с магнитом, проходит через катушку индуктивности, что вызывает изменение магнитного потока и, как следствие, формирование сигнала ЭДС, пропорционального скорости движения индентора на всем временном интервале КУВ [1]. Однако следует отметить, что значения параметров первичного преобразователя и устройства его разгона в указанном стандарте не нормированы [2]. Одним из основных требований к разработке системы регистрации параметров движения индентора является пропорциональность ЭДС скорости его движения [3]. Данное требование реализуется конструктивными особенностями системы регистрации, в том числе электрическими параметрами катушки индуктивности.

Прототип датчика динамического индентирования. Одним из основных элементов датчика динамического индентирования является первичный преобразователь, с помощью которого производится регистрация параметров движения индентора при КУВ [4]. В настоящее время для регистрации параметров движения индентора в большинстве преобразователей используется одна катушка индуктивности (ГОСТ Р ИСО 8568-2010). Однако при пересечении постоянным магнитом такой катушки индуктивности количество силовых линий магнитного поля зависит от его положения. Вследствие этого выходное значение ЭДС является как функцией скорости, так и положения магнита внутри катушки индуктивности [1]. Этот недостаток объясняется тем, что, когда ударник центрирован относительно катушки индуктивности, линии потока, которые обусловлены отрицательным полюсом, также могут индуцировать ЭДС в катушке противоположной полярности. К дополнительным посторонним факторам, влияющим на точность регистрации параметров движения индентора, также следует отнести импульсные помехи, вихревые токи и температурный дрейф [5].

Для устранения этих недостатков предлагается реализация магнитоиндукционного метода с использованием двух дифференциально включенных катушек индуктивности: см. рис. 1, *a* — 3D-визуализация метода, *б* — схема метода. Отличие данного метода регистрации движения ударника заключается в разнонаправленных катушках индуктивности.

Физический смысл рассматриваемого метода состоит в следующем: в рабочем диапазоне преобразователя оба конца постоянного магнита находятся внутри катушки, которая разделена на две секции [6]. В каждой секции катушки расположен свой полюс магнита. Эти две катушки имеют разное направление витков и соединяются последовательно, чтобы получить

выходное напряжение постоянного тока, пропорциональное скорости магнита [7, 8]. 3D-модель разработанного прототипа первичного преобразователя представлена на рис. 2: *а* — прототип в сечении, *б* — прототип без защитной крышки, *в* — разрез системы регистрации с двумя катушками.

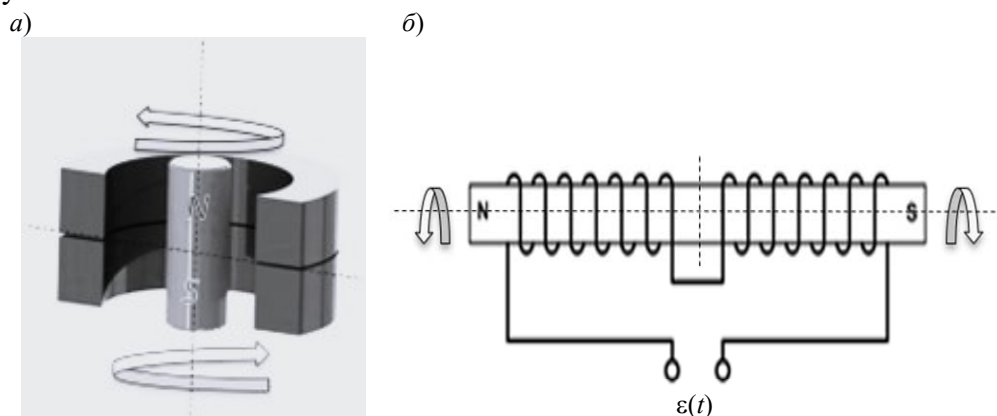


Рис. 1

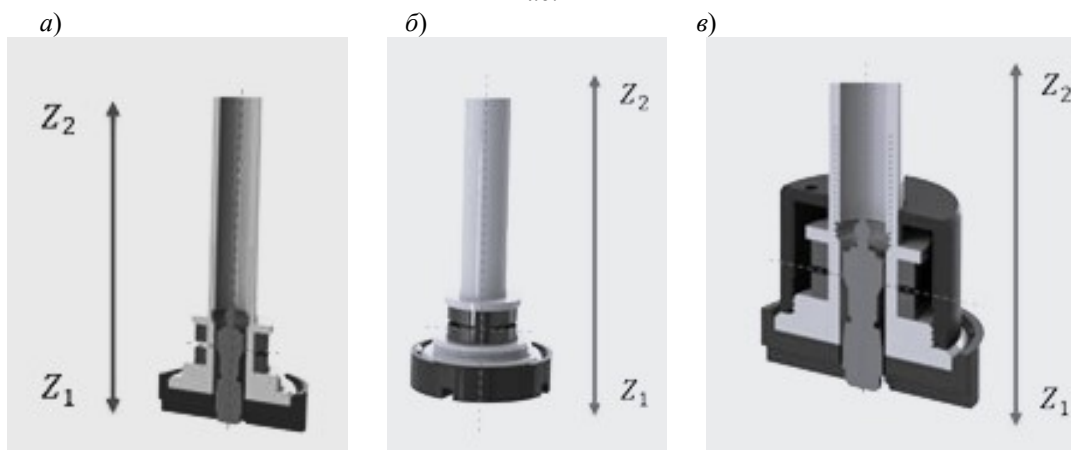


Рис. 2

Получение высокоточного сигнала зависит от многих электрических и геометрических параметров катушки индуктивности, а также от взаиморасположения магнита относительно катушки [9]. При разработке вышеуказанного прототипа были определены следующие электрические параметры катушки индуктивности: сопротивление $R = 62,4$ Ом, длина проводника $L = 30$ м, количество витков $n = 695$ и сечение проводника $S = 0,1$ мм (марка проводника — ПЭТВ-2).

Компьютерное моделирование. Для практической апробации предложенной реализации магнитоиндукционного метода была разработана компьютерная модель, выполненная в программе конечно-элементного анализа Comsol Multiphysics. Для решения задачи регистрации параметров движения ударника был использован интерфейс Magnetic Fields модуля AC/DC. Геометрия модели построена в двух измерениях с осесимметричным отображением. Характеристики магнита заданы с помощью инструмента Ampere's Law, а характеристики катушки — с помощью инструмента Coil. Сетка построена с учетом необходимости деформации двух доменов в движимой части, поэтому для них была использована mapped-сетка с переносом размерности на части Infinite element domain посредством инструментов edge и core edge и последующим наложением mapped-сетки. Для остальных элементов была использована сетка free triangular. На рис. 3 представлена компьютерная модель регистрации пролета ударника через дифференциально включенную катушку индуктивности: *а* — визуализации компьютерной модели, *б* — зависимость ЭДС от времени.

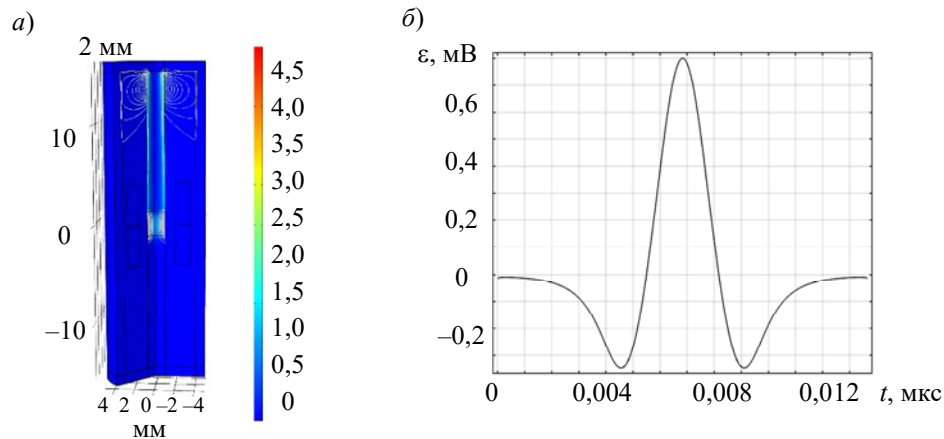


Рис. 3

С использованием разработанной компьютерной модели было проанализировано влияние изменения геометрических параметров дифференциально включенных катушек индуктивности на изменение ЭДС от времени. Основные геометрические параметры первичного преобразователя датчика динамического индентирования — диаметр и высота (длина) магнита (D_M и L_M) и диаметр и длина катушки индуктивности (D_K и L_K). Схема прототипа датчика с магнитоиндукционным включением катушек индуктивности приведена на рис 4.

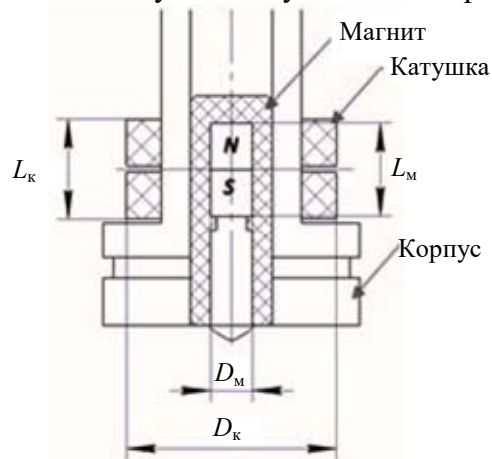


Рис. 4

На рис. 5 представлены зависимости изменения значений ЭДС от времени при пролете магнита различной высоты через катушку индуктивности: *а* — $L_M < L_K$, *б* — $L_M = L_K$, *в* — $L_M > L_K$. Анализ полученных результатов моделирования показал, что при дифференциальной схеме включения катушек индуктивности высота магнита не должна превышать длину катушки индуктивности [10].

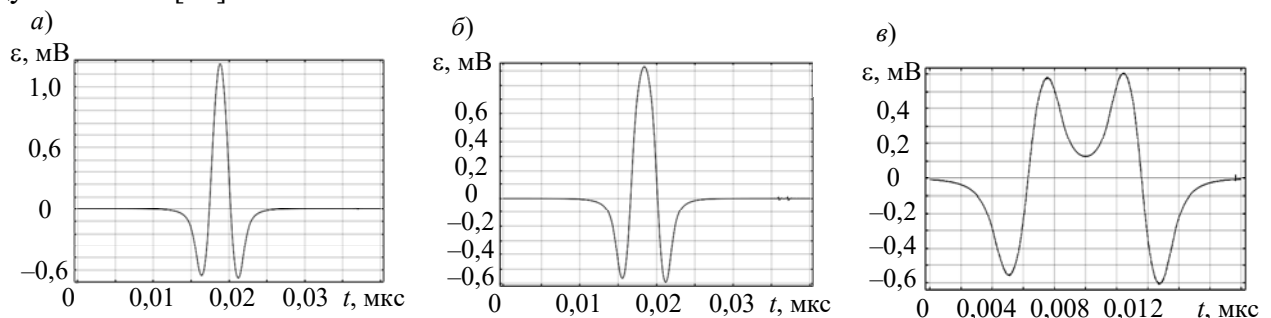


Рис. 5

Согласно результатам моделирования, были выбраны следующие геометрические параметры прототипа первичного преобразователя: $D_K=18$ мм, $L_K=9$ мм, $D_M=4$ мм, $L_M=9$ мм.

Экспериментальная отработка прототипа датчика динамического индентирования. Для подтверждения работоспособности прототипа датчика динамического индентирования был выполнен эксперимент, суть которого заключалась в регистрации зависимости $\varepsilon(t)$ на временном промежутке пролета ударника через катушку индуктивности при его гравитационном сбросе с различной высоты. Эксперимент проводился с использованием экспериментальной установки, схематично представленной на рис. 6. Изменение ЭДС во времени регистрировалось с помощью цифрового осциллографа марки RohdeSchwarz, высота сброса ударника H_i обеспечивалась конструкцией экспериментальной установки.

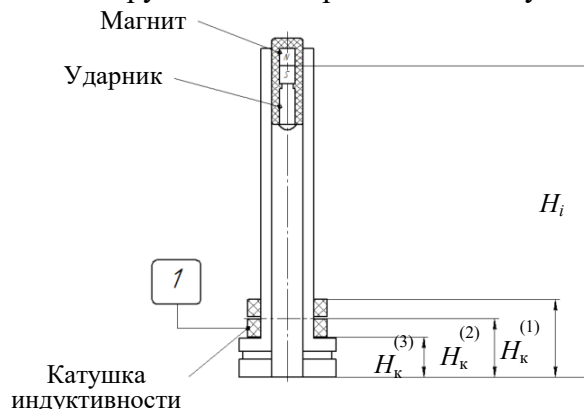


Рис. 6

Скорость пролета ударника через катушку индуктивности определялась по следующей формуле:

$$V_i^{(j)} = \sqrt{2gh_i^{(j)}} \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$);

$$h_i^{(j)} = H_i - H_k^{(j)} \quad (\text{см. рис. 6}). \quad (2)$$

На рис. 7 приведен экспериментально полученный график $\varepsilon(t)$, экстремумы значений $\varepsilon^{(j)}$ соответствуют скоростям $V_i^{(j)}$.

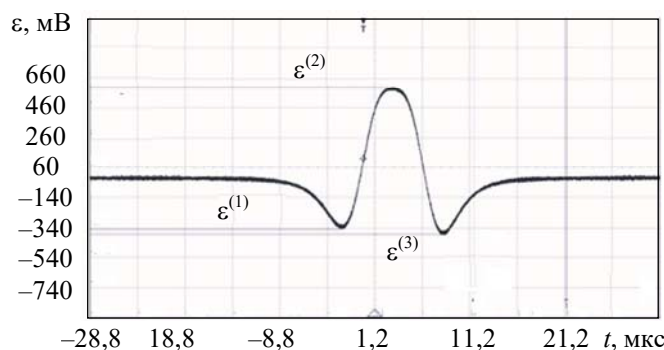


Рис. 7

В таблице представлены результаты экспериментов, включающие 5 серий измерений изменения ЭДС во времени при сбросе ударника с различной высоты, с оценкой скорости его пролета через середину катушки индуктивности.

$h_i^{(2)}$, мм	$\varepsilon_i^{(2)}$, мВ					Среднее значение ε , мВ	СКО, мВ	$V_i^{(2)}$, м/с
	1	2	3	4	5			
185	403	522	468	499	445	467,4	46,4	1,9
225	490	550	501	540	518	519,8	25,3	2,1
256	515	510	559	565	586	547,0	33,1	2,2
297	583	550	640	639	602	602,8	38,3	2,4

На рис. 8 приведены результаты аппроксимации зависимости скорости пролета ударника от ЭДС, которая представляется линейной регрессионной зависимостью вида:

$$V^{(2)} = 0,0037\varepsilon^{(2)} + 0,1781. \quad (3)$$

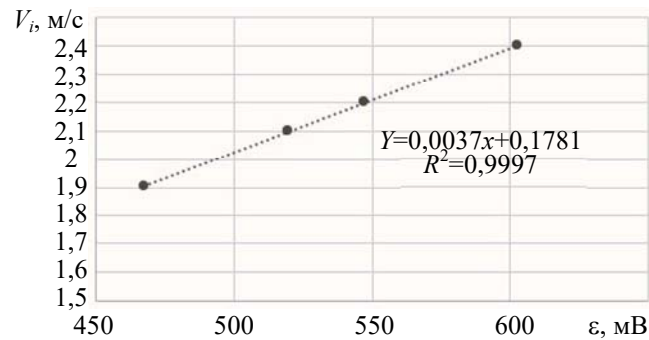


Рис. 8

Коэффициент детерминации и относительная ошибка аппроксимации эмпирической зависимости с помощью линейной функции вида (3) составили $R^2=0,9997$, $\varepsilon=0,18\%$, что свидетельствует о пропорциональности скорости движения индентора к ЭДС. Тем самым предложенная в рамках данного исследования схема реализации магнитоиндукционного метода с использованием двух дифференциально включенных катушек индуктивности позволяет существенно снизить зависимость получаемого сигнала ЭДС от взаиморасположения магнита и катушек индуктивности, а значит, повысить точность регистрации параметров движения индентора [11].

Заключение. В работе рассмотрена возможность применения магнитоиндукционного метода с дифференциальным включением катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании, разработан прототип датчика для прибора динамического индентирования. При его разработке предложено использовать магнитоиндукционный способ с двумя катушками для регистрации движения индентора, а также элементы программной обработки исходного сигнала ЭДС. Разработана компьютерная модель регистрации пролета ударника через дифференциально включенную катушку индуктивности. Проведена экспериментальная отработка прототипа датчика. Полученные экспериментальные данные подтверждают целесообразность применения предложенного способа реализации магнитоиндукционного метода для повышения точности регистрации параметров движения индентора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крень А. П., Рабцевич А. В., Зинкевич Н. В. Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при изменении твердости // Изв. НАУ Беларуси. Серия. Физико-технические науки. 2017. № 4. С. 38—45.
2. Крень А. П., Рудницкий В. А., Делендик М. Н. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9, № 3. С. 263—271.
3. Колганов О. А., Лукьянов Г. Н., Федоров А. В. Обоснование выбора метода регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2022. Т. 2. С. 54—57.
4. Марусин М. П., Протасеня Т. А. Разработка первичного преобразователя прибора динамического индентирования для измерения механических свойств материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 10. С. 85—87.
5. Колганов О. А., Лукьянов Г. Н. Разработка экспериментального стенда для стационарных исследований конструктивных элементов датчика динамического индентирования // Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых. 2022.

6. Энергетический подход к определению твердости материалов при индентировании сферой / П. М. Огар, В. А. Тарасов, И. Б. Федоров // *Механика XXI века*. 2013. № 12. С. 66—70.
7. Medital [Электронный ресурс]: <<https://www.medital.com/products/lvt-linear-velocity-transducers>>, 02.03.2022.
8. Electricaldesk [Электронный ресурс]: <<https://www.electricaldeck.com/2021/07/measurement-of-linear-velocity-using-velocity-transducers.html>>, 02.03.2022.
9. Пат. 20080517 Беларусь, МПК (2006) G01N 3/00, BY 5150 U. Магнитоиндукционный датчик для измерения параметров динамического индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, О. В. Мацулевич. Опубл. 30.04.2009.
10. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования / Р. А. Егоров, А. В. Ильинский, М. В. Кузьмичев, А. В. Федоров // *Дефектоскопия*. 2020. № 6. С. 61—69.
11. Обеспечение единства измерений твердости динамическим методом в Российской Федерации / А. И. Попанов, В. А. Сясько, К. В. Гоголинский, А. А. Никазов // *Контроль. Диагностика*. 2016. № 4. С. 44—49.

Сведения об авторах

- | | |
|---|---|
| Олег Александрович Колганов | — аспирант; Университет ИТМО; E-mail: kolganoff2014@yandex.ru |
| Александр Вячеславович Ильинский | — Университет ИТМО; ассистент; E-mail: allill003@mail.ru |
| Роман Александрович Егоров | — Университет ИТМО; ассистент; E-mail: roman1465@yandex.ru |
| Александр Евгеньевич Хошев | — студент; Университет ИТМО; E-mail: severenarwhal@gmail.com |
| Алексей Владимирович Федоров | — Университет ИТМО; доцент; E-mail: afedor62@yandex.ru |

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. Kren A.P., Rudnitsky V.A., Zinkevich N.V. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series*, 2017, no. 4, pp. 38–45. (in Russ.)
2. Kren A.P., Rudnitsky V.A., Delendik M.N. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, no. 3(9), pp. 263–271. (in Russ.)
3. Kolganov O.A., Lukyanov G.N., Fedorov A.V. *Almanac of Scientific Works of Young Scientists at ITMO University*, 2022, vol. 2, pp. 54–57. (in Russ.)
4. Marusin M.P., Protasenyia T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 10(57), pp. 85–87. (in Russ.)
5. Kolganov O.A., Lukyanov G.N. *Collection of abstracts of reports of the congress of young scientists*, 2022. (in Russ.)
6. Ogar P.M., Tarasov V.A., Fedorov I.B. *Mechanics – XXI century*, 2013, no. 12, pp. 66–70. (in Russ.)
7. *Medital*, <https://www.medital.com/products/lvt-linear-velocity-transducers>. (in Russ.)
8. *Electricaldesk*, <https://www.electricaldeck.com/2021/07/measurement-of-linear-velocity-using-velocity-transducers.html>. (in Russ.)
9. Patent BY 20080517, G01N 3/00, BY 5150 U, *Magnitoinduktsionnyy datchik dlya izmereniya parametrov dinamicheskogo indentirovaniya* (Magnetic Induction Sensor for Measuring the Parameters of Dynamic Indentation), V.A. Rudnitsky, A.P. Kren, O.V. Matsulevich, Published 30.04.2009. (in Russ.)
10. Egorov R.A., Ilinskiy A.V., Kuzmichev M.V., Fedorov A.V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, no. 6, pp. 61–69. (in Russ.)
11. Potapov A.I., Syasko V.A., Gogolinskiy K.V., Nikazov A.A. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 44–49. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|------------------------------|---|
| Oleg A. Kolganov | — Post-Graduate Student; ITMO University; E-mail: kolganoff2014@yandex.ru |
| Alexander V. Ilyinsky | — ITMO University; Assistant; E-mail: allill003@mail.ru |
| Roman A. Egorov | — ITMO University; Assistant; E-mail: roman1465@yandex.ru |
| Alexander E. Khoshev | — Student; ITMO University; E-mail: severenarwhal@gmail.com |
| Alexey V. Fedorov | — ITMO University; Associate Professor; E-mail: afedor62@yandex.ru |

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.