



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**2023 Том 24 № 3**

**DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3**

**<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>**

**Научный журнал**

**Издается с 2000 г.**

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

**Свидетельство о регистрации** ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

**Учредитель:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

---

**Главный редактор**

*Разумный Юрий Николаевич* – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, директор департамента механики и механики Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Заместитель главного редактора**

*Резник Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», факультет «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Ответственный секретарь**

*Агасиева Светлана Викторовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Члены редакционной коллегии**

*Агравал Бридж* – профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

*Алифанов Олег Михайлович* – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Варатараджу Ренугант* – профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

*Василе Массимилиано Л.* – профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

*Вивiani Антонио* – профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

*Гасбарри Паоло* – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Герман Анна* – профессор, Университет Бейра-Интернор, Ковильян, Португалия

*Гитас Иоаннис Зоис* – профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

*Грациани Филлиппо* – почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Гурфил Пини* – почетный профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

*Джеа Морисба* – доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

*Дженета Джанкарло* – профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

*Кавагути Дзюньитиро* – профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

*Кадугин Владимир Тимофеевич* – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*Капустин Владимир Михайлович* – доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

*Кузнецов Николай Борисович* – профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

*Лишарес Ричард* – профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

*Матюшин Максим Михайлович* – доктор технических наук, Центр управления полетами ЦНИИмаш, ГК «Роскосмос», Королев, Россия

*Медведев Андрей Всеволодович* – доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

*Мисра Арун* – профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

*Мортари Даниэле* – профессор, Техасский университет А&М, Колледж-Стейшн, США

*Мохаммед Сейду О.* – профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

*Палмерини Джованни* – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Петухов Вячеслав Георгиевич* – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Попков Юрий Соломонович* – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

*Попов Гарри Алексеевич* – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*Прадо Антонио* – профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

*Редько Иван Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского, Москва, Россия

*Спенсер В. Дэвид* – профессор, Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-Парк, США

*Фурфаро Роберто* – профессор, Университет Аризоны, Тусон, США

*Челани Фабио* – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

*Черн Рок Ченг-Шинг* – профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

*Ясака Тэцуо* – почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.  
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions.

**Цель и тематика**

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» – периодическое международное рецензируемое научное издание в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям:

- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки);
- 2.5.6. Технологии машиностроения (технические науки);
- 2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки);
- 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки).

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

---

Редактор *И.Л. Панкратова*  
Редактор англоязычных текстов *А.С. Корзин*  
Компьютерная верстка *Н.В. Маркелова*

**Адрес редакции:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-07-16; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Адрес редакционной коллегии журнала**

**«Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования»:**

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3  
Тел.: +7 (495) 955-07-92; E-mail: [engi@rudn.ru](mailto:engi@rudn.ru)

---

Подписано в печать 22.09.2023. Выход в свет 27.09.2023. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 9,42 Тираж 500 экз. Заказ № 1118. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН им. Патриса Лумумбы

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-08-74; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2023 Volume 24 Number 3

DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

---

### Editor-in-Chief

**Yury N. Razumny** – Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

### Associate Editor-in-Chief

**Sergey V. Reznik** – Dr. (Technical Sciences), Professor, Head of the Department SM-13 “Composite Materials for Aerospace”, Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### Assistant to the Editor-in-Chief

**Svetlana V. Agasieva** – Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

### Editorial Board

**Brij Agrawal** – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

**Oleg M. Alifanov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Fabio Celani** – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Rock Jeng-Shing Chern** – Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

**Roberto Furfaro** – Professor, University of Arizona, Tucson, USA

**Paolo Gasbarri** – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Giancarlo Genta** – Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

**Ioannis Zois Gitas** – Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

**Filippo Graziani** – Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Anna Guerman** – Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

**Pini Gurfil** – Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

**Moriba Jah** – Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

**Vladimir T. Kalugin** – Dr. (Technical Sciences), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Vladimir M. Kapustin** – Dr. (Technical Sciences), Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Gubkin University), Moscow, Russia

**Junichiro Kawaguchi** – Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

**Nikolay B. Kuznetsov** – Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Richard Linares** – Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

**Maxim M. Matyushin** – Dr. (Technical Sciences), Mission Control Center (TSUP), Central Research Institute for Machine Building (TsNIIMash), State Space Corporation “Roscosmos”, Korolev, Russia

**Andrey V. Medvedev** – Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Arun Misra** – Professor, McGill University, Montreal, Canada

**Seidu O. Mohammed** – Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

**Daniele Mortari** – Professor, Texas A&M University, College Station, USA

**Giovanni Palmerini** – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

**Vyacheslav G. Petukhov** – Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Yury S. Popkov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Institute for Systems Analysis, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Harri A. Popov** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Antonio Prado** – Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

**Ivan Y. Redko** – Dr. (Technical Sciences), Professor, Krzhizhanovskiy Energy Institute, Moscow, Russia

**David B. Spencer** – Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

**Renuganth Varatharajoo** – Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

**Massimiliano L. Vasile** – Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

**Antonio Viviani** – Professor, University of Campania “Luigi Vanvitelli”, Naples, Italy

**Tetsuo Yasaka** – Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

Published by the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Publication frequency: quarterly.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions.

### Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Research — is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of aviation and space technology, mechanical engineering. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE:  
<http://publicationethics.org>

---

Copy Editor — *I.L. Pankratova*  
English Texts' Editor — *A.S. Korzin*  
Layout Designer — *N.V. Markelova*

**Address of the editorial board:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-16; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

**Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Research:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-07-92; E-mail: [engi@rudn.ru](mailto:engi@rudn.ru)

---

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba  
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

**Printed at RUDN Publishing House:**

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation  
Ph.: +7 (495) 955-08-74; E-mail: [publishing@rudn.ru](mailto:publishing@rudn.ru)

## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Андронов В.Г., Чуев А.А., Дубровский Н.С.</b> Детектирование траектории беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам .....	213
<b>Ильченко А.В., Ильченко Т.Е.</b> Исследование потоков информации в транкинговой радиосети для операций наземного обслуживания воздушных судов .....	223
<b>Решмин С.А., Бектыбаева М.Т.</b> Эффективное управление направлением тяги при скоростном маневре в плоскости.....	233
<b>Миллер А.С.</b> Автоматизация выбора подрядчиков с применением искусственных нейронных сетей для повышения качества и технологической безопасности .....	241
<b>Korotkiy S.S., Saltykova O.A., Ukharov A.O., Shlivko I.L., Klemenova I.A., Garanina O.E., Uskova K.A., Mironycheva A.M., Stepanova Y.L.</b> Comparison analysis of AI-based smartphone applications for self-examination of skin cancer risk (Сравнительный анализ смартфон-приложений на базе искусственного интеллекта для самостоятельной оценки риска рака кожи) .....	262
<b>Завитков А.В., Локтев А.С., Люхтер А.Б., Фролов К.А.</b> Пути снижения неметаллических включений в покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой .....	271
<b>Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Malkova M.Yu.</b> Application of experimental data based on Taguchi approach to optimize machining parameters of Al6061-T6 to reduce cutting forces and moments. (Использование метода Тагучи при обработке Al6061-T6 с целью уменьшения сил и моментов резания) .....	279

## CONTENTS

<b>Andronov V.G., Chuev A.A., Dubrovsky N.S.</b> Detection of unmanned aerial vehicle trajectory using overlapping images .....	213
<b>Ilchenko A.V., Ilchenko T.E.</b> Information flows research in trunked radio network for aircraft ground handling operations .....	223
<b>Reshmin S.A., Bektybaeva M.T.</b> Efficient control of the direction of thrust during high-speed maneuver in the plane .....	233
<b>Miller A.S.</b> Automation of contractors' selection applying artificial neural networks to increase quality and technological security .....	241
<b>Korotkiy S.S., Saltykova O.A., Ukharov A.O., Shlivko I.L., Klemenova I.A., Garanina O.E., Uskova K.A., Mironycheva A.M., Stepanova Y.L.</b> Comparison analysis of AI-based smartphone applications for self-examination of skin cancer risk .....	262
<b>Zavitkov A.V., Loktev A.S., Lyukhter A.B., Frolov K.A.</b> Methods for reducing non-metallic inclusions in coatings applied by laser surfacing .....	271
<b>Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Malkova M.Yu.</b> Application of experimental data based on Taguchi approach to optimize machining parameters of Al6061-T6 to reduce cutting forces and moments. ....	279



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222

EDN: VNZREN

УДК 528.851:528.88

Научная статья / Research article

## Детектирование траектории беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам

В.Г. Андронов , А.А. Чуев , Н.С. Дубровский 

Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация  
✉ vladia58@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 16 января 2023 г.

Доработана: 12 апреля 2023 г.

Принята к публикации: 15 апреля 2023 г.

### Ключевые слова:

аэрофотосъемка, навигация,  
параллакс изображений,  
инерциальные измерения,  
потеря спутниковых сигналов

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии  
конфликта интересов.

**Аннотация.** В настоящее время широко используются беспилотные летательные аппараты, навигация которых основывается на данных бортовых интегрированных систем, включающих в себя инерциальные и спутниковые датчики. При этом для решения многих целевых задач обеспечивается их предварительный выход в заданную точку маршрута полета по кратчайшей горизонтальной траектории. Однако на практике возможны ситуации, когда получаемая от навигационных спутников информация может перестать быть доступной, что приводит к снижению точности навигации. Рассмотрена методика детектирования траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях потери сигналов от навигационных спутников по снимкам подстилающей поверхности. В качестве критерия, свидетельствующего о возникновении отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории, предложено использовать изменение параллаксов смежных пар снимков. Представлены аналитические соотношения, описывающие функциональную связь изменений параллаксов снимков и параметров линейных и угловых отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории и учитывающие все возможные варианты этих отклонений. Полученные результаты позволяют путем моделирования выполнить априорную оценку пороговой величины изменений параллаксов, соответствующей допустимому уровню отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории. Основываясь на этой оценке, можно повысить точность детектирования траектории беспилотных летательных аппаратов в условиях потери сигналов от навигационных спутников.

### Для цитирования

Андронов В.Г., Чуев А.А., Дубровский Н.С. Детектирование траектории беспилотных летательных аппаратов по перекрывающимся снимкам // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 213–222. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>



## Detection of unmanned aerial vehicle trajectory using overlapping images

Vladimir G. Andronov , Andrey A. Chuev ,  
Nikita S. Dubrovsky 

Southwest State University, Kursk, Russian Federation

 vladia58@mail.ru

### Article history

Received: January 16, 2023

Revised: April 12, 2023

Accepted: April 15, 2023

### Keywords:

aerial photography, navigation,  
image parallax, inertial measurements,  
loss of satellite signals

### Conflicts of interest

The authors declare that there  
is no conflict of interest.

**Abstract.** Currently, unmanned aerial vehicles are widely used with navigation based on data from onboard integrated systems including inertial and satellite sensors. In this case, to solve many target tasks, their preliminary exit to a given point of the flight route along the shortest horizontal trajectory is provided. However, in practice, there may be situations when the information received from navigation satellites may no longer be available, which leads to a decrease in navigation accuracy. Considered a technique for detecting the trajectory of unmanned aerial vehicles under conditions of loss of signals from navigation satellites using the underlying surface images. As a criterion indicating the occurrence of deviations of unmanned aerial vehicles from a specified trajectory, it is proposed to use the change in parallaxes of adjacent pairs of images. Analytical relations describing the functional relationship between changes in image parallaxes and parameters of linear and angular deviations of unmanned aerial vehicles from a specified trajectory. All possible options of these deviations are also considered. The obtained results provide an a priori estimate of the threshold value of parallax changes corresponding to the acceptable level of unmanned aerial vehicles deviations from the specified trajectory by means of modelling. Based on this estimate, it is possible to improve the accuracy of trajectory detection of unmanned aerial vehicles under conditions of loss of signals from navigation satellites.

### For citation

Andronov VG, Chuev AA, Dubrovsky NS. Detection of unmanned aerial vehicle trajectory using overlapping images. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):213–222. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-213-222>

### Введение

Для навигационного обеспечения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в интересах дистанционного зондирования наземных объектов широко применяются интегрированные системы, включающие в себя бортовые инерциальные датчики и приемники спутниковой информации GPS и/или ГЛОНАСС [1–3]. Необходимость использования спутниковых сигналов обусловлена зависимостью точности инерциальных датчиков от длительности их автономной работы, что связано с накоплением ошибок измерений [4–8]. В частности, в [9] представлены данные экспериментальных исследований точности навигации малоразмерных БЛА, которые свидетельствуют о стремительном росте уровня ошибок инерциальных измерений в случае нештатной потери сигналов от спутников (табл. 1).

Для использования БЛА по целевому назначению часто предусматривается их предварительный выход в заданную точку маршрута по кратчайшей горизонтальной прямолинейной траектории. Очевидно, что в условиях потери сигналов от спутников могут возникнуть существенные отклонения БЛА от заданной траектории, снижающие эффективность решения целевых задач. В этой связи актуальна разработка методик детектирования траектории БЛА по дополнительной информации, в частности по регистрируемому в процессе полета изображению подстилающей поверхности [10–13]. Здесь и далее под детектированием траектории будем понимать проверку наличия ее отклонений от горизонтального маршрута полета в задачах навигационного обеспечения выхода БЛА в заданную точку маршрута полета.

Таблица 1

Ошибки при горизонтальном полете БЛА		
Погрешности в штатном режиме полета		Погрешности инерциальных измерений через пять минут после потери сигналов от спутников
Углы тангажа и крена, °	0,1	0,4
Угол рыскания, °	0,2	3,0
Высота полета БЛА, м	2,0	6,0
Путевая скорость, м\с	0,2	5,0
Координаты, м	6	500

Table 1

Errors during horizontal flight of UAVs		
Errors in normal flight mode		Errors in inertial measurements five minutes after the loss of satellite signals
Pitch and roll angles, °	0.1	0.4
Yaw angle,	0.2	3.0
UAV flight altitude, m	2.0	6.0
Ground speed, m/s	0.2	5.0
Coordinates, m	6	500

### 1. Анализ известных методов, цель и задачи исследования

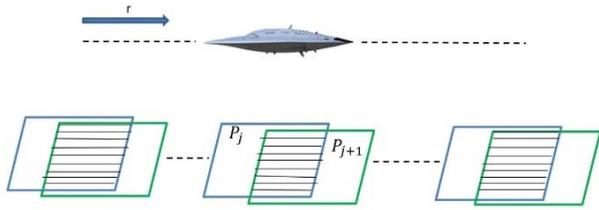
Суть известных фотограмметрических методов обработки изображений подстилающей поверхности на борту БЛА в интересах их навигации сводится к нахождению их элементов внешнего или взаимного ориентирования [14–16]. Первый подход основан на методе обратной фотограмметрической засечки по одиночным или перекрывающимся изображениям, второй — на свойствах компланарности векторов, соединяющих центры проекций и соответственные пары точек в зоне перекрытия снимков. Однако, поскольку задача детектирования должна решаться непрерывно на всем участке полета БЛА к заданной точке их целевого применения, применение этих методов требует многократного определения параметров ориентации БЛА с использованием достаточно существенных вычислительных затрат. В ряде случаев эти вычислительные ресурсы целесообразно направить на реализацию других задач, особенно на борту малоразмерных БЛА [12]. В этой связи целью исследования является разработка методики, обеспечивающей возможность детектирования траектории горизонтального полета БЛА по перекрывающимся изображениям подстилающей поверхности без определения абсолютных значений их элементов внешнего или взаимного ориентиро-

вания. Для этого необходимо решить следующие основные задачи: выполнить математическое описание взаимной ориентации систем координат (СК) БЛА и изображений, получить аналитические соотношения, описывающие функциональную связь изменений параллаксов изображений и отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории, найти оценки степени влияния этих отклонений на уровень изменений параллаксов. Рассмотрим содержание и результаты решения этих задач.

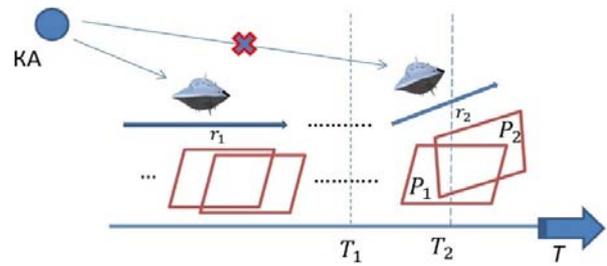
### 2. Взаимная ориентация беспилотных летательных аппаратов и изображений

Будем, как и в [11], считать, что в штатном режиме БЛА принимает и использует сигналы от навигационных спутников, заданная траектория полета представляет собой прямолинейный маршрут  $r$ , параллельный плоскости местного горизонта, и в процессе полета производится аэрофотосъемка с заданным процентом перекрытия снимков  $P_j, P_{j+1}$  (рис. 1).

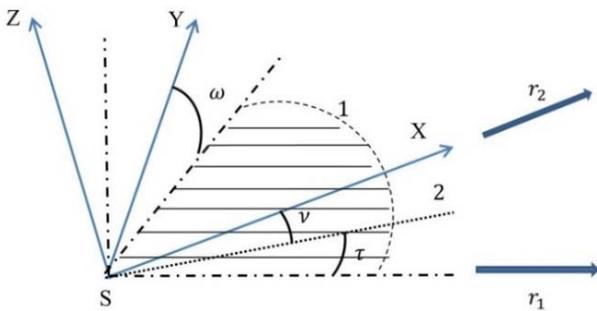
Поскольку площадь регистрируемых территорий в полосе захвата смежных пар горизонтальных снимков  $(P_j, P_{j+1})$ ,  $(P_{j+2}, P_{j+3})$  достаточно мала, изменениями рельефа местности в ее пределах можно пренебречь и считать, что эти снимки получены с одинаковой высоты. Положим также, что в какой-то момент времени  $T = T_1$



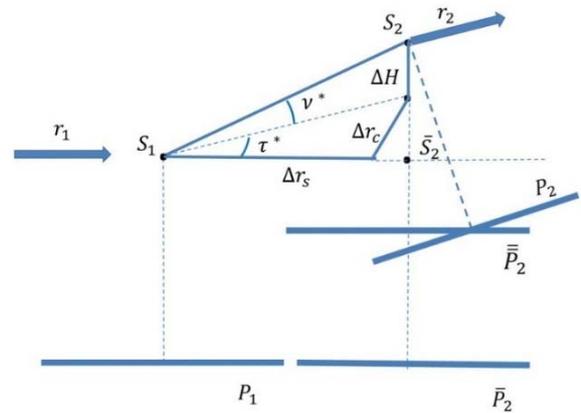
**Рис. 1.** Заданная траектория БЛА  
**Figure 1.** The specified UAV trajectory



**Рис. 2.** Иллюстрация изменения заданной траектории полета БЛА  
**Figure 2.** Illustration of a change in a specified UAV flight trajectory



**Рис. 3.** Система координат SXYZ  
**Figure 3.** SXYZ coordinate system



**Рис. 4.** Вариации отклонений БЛА  
**Figure 4.** Variations of UAV deviations

полета БЛА по штатной горизонтальной траектории  $r_1$  сигналы от спутников были потеряны, а в моменты  $T = T_2$  и  $T = T_2 + \Delta T$  получена пара перекрывающихся снимков  $P_1$  и  $P_2$ , причем первый — горизонтальный, а второй — плановый (рис. 2).

Введем связанную с осями инерции БЛА СК SXYZ (рис. 3) и определим его угловую ориентацию относительно земной поверхности.

В соответствии с российским государственным стандартом<sup>1</sup> угол  $v$  между продольной осью БЛА SX и плоскостью местного горизонта  $l$  — это угол тангажа, угол крена  $\omega$  — угол между поперечной осью БЛА SY и плоскостью  $l$ , а угол рыскания  $\tau$  — угол между проекцией 2 нештатной траектории  $r_2$  на плоскость  $l$  и штатной траекторией  $r_1$ .

Очевидно, что при отсутствии отклонений текущего маршрута полета БЛА от штатной гори-

зонтальной траектории (см. рис. 1) углы тангажа и рыскания равны нулю. Положим для определенности, что в этом случае и угол крена равен нулю. Поскольку в момент получения второго снимка пары  $P_1$  и  $P_2$  в общем случае возможны отклонения траектории по высоте  $\Delta H$  и/или курсу  $\Delta r_c$  полета и/или изменения ориентации БЛА по углам  $v$ ,  $\omega$  и  $\tau$  (рис. 4). Тогда условимся, что обозначение  $P_2$  второго снимка на рис. 4 означает наличие в момент его получения отклонений траектории БЛА по высоте и направлению полета с изменением его ориентации,  $\bar{P}_2$  — по высоте и направлению полета без изменения ориентации, а  $\bar{\bar{P}}_2$  — отсутствие отклонений, как по высоте и направлению полета, так и изменений ориентации.

При этом линейные отклонения  $\Delta H$ ,  $\Delta r_c$  от заданной траектории  $r_1$  по высоте и направлению

<sup>1</sup> ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения (с поправками). М.: Издательство стандартов, 1981. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-20058-80>.

полета и углы ориентации  $v^*, \tau^*$  базиса  $S_1 S_2$  съемки связаны соотношениями:

$$\Delta H = \Delta r_S \operatorname{tg} v^* / \cos \tau^*; \quad (1)$$

$$\Delta r_c = \Delta r_S \operatorname{tg} \tau^*, \quad (2)$$

где  $\Delta r_S$  — расстояние между центрами проекции  $S_1$  и  $S_2$  в плоскости местного горизонта.

Положим также, что оси СК снимков  $P_1, P_2, \bar{P}_2, \bar{\bar{P}}_2$  параллельны осям СК, связанных с БЛА в моменты их получения. Тогда оси СК горизонтальных снимков будут параллельны осям фотограмметрической СК земной поверхности  $OXYZ$ , а углы тангажа  $v$ , крена  $\omega$  и рыскания  $\tau$ , определяющие ориентацию БЛА относительно этой СК, являются в то же время углами взаимной ориентации снимков  $P_1$  и  $P_2, P_2$  и  $\bar{\bar{P}}_2$  (рис. 5).

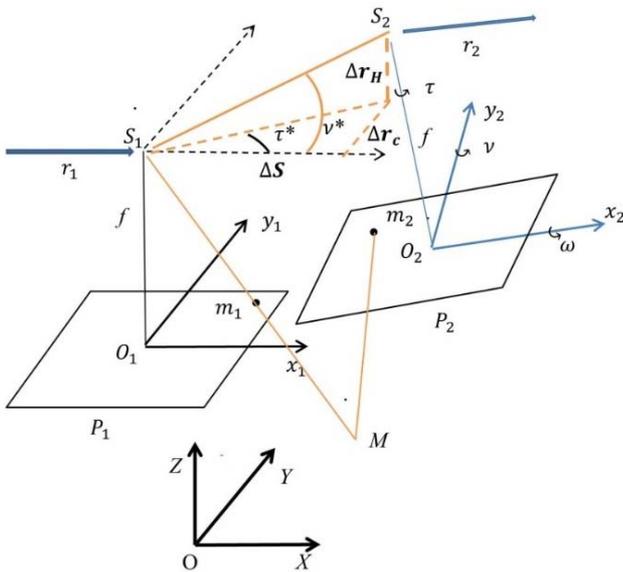


Рис. 5. Координатное пространство  
Figure 5. Coordinate space

Учитывая изложенное, угловая ориентация БЛА в нештатном режиме будет определяться взаимной ориентацией осей СК  $O_1 x_1 y_1$  и  $O_2 x_2 y_2$  или осей СК  $O_2 x_2 y_2$  и  $\bar{\bar{O}}_2 \bar{x}_2 \bar{y}_2$ , и описываться известной матрицей направляющих косинусов [11]:

$$A = A_v A_\omega A_\tau, \quad (3)$$

где:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix},$$

$$A_v = \begin{vmatrix} \cos v & 0 & -\sin v \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin v & 0 & \cos v \end{vmatrix},$$

$$A_\omega = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{vmatrix},$$

$$A_\tau = \begin{vmatrix} \cos \tau & \sin \tau & 0 \\ -\sin \tau & \cos \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos v \cos \tau - \sin v \sin \omega \sin \tau, \\ a_{12} &= -\cos v \sin \tau - \sin v \sin \omega \cos \tau, \\ a_{13} &= -\sin v \cos \omega, \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \tau, \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \tau, \\ a_{23} &= -\sin \omega, \\ a_{31} &= \sin v \cos \tau + \cos v \sin \omega \sin \tau, \\ a_{32} &= -\sin v \sin \tau + \cos v \sin \omega \cos \tau, \\ a_{33} &= \cos v \cos \omega. \end{aligned} \quad (5)$$

### 3. Математическая модель детектирования траектории беспилотных летательных аппаратов

Для получения аналитических соотношений, описывающих модель детектирования траектории БЛА, отметим следующее. Для параллаксов перекрывающихся горизонтальных снимков, полученных с одной высоты полета БЛА, можно записать<sup>2</sup>, что

$$\begin{cases} p_{ш} = p_{j,j+1} = x_j - x_{j+1} = \text{const}; \\ q_{ш} = q_{j,j+1} = y_j - y_{j+1} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку по условиям задачи справедливы соотношения  $x_j - x_{j+1} = x_{j+2} - x_{j+3}; y_j - y_{j+1} = y_{j+2} - y_{j+3}$ , отличие от нуля разностей продольных и поперечных параллаксов смежных пар снимков является критерием наличия отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории полета [11]. Тогда задача детектирования траектории БЛА сводится к последовательному

<sup>2</sup> Михайлов А.П. Фотограмметрия: учебник для вузов / под общей редакцией А.Г. Чибуничева. М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2016. 294 с.

сравнению продольных и поперечных параллаксов каждой текущей смежной пары регистрируемых снимков. При этом горизонтальные снимки  $P_1$  и  $\bar{P}_2$  будут характеризоваться одинаковой высотой съемки  $H$  и углами взаимного ориентирования  $\nu^* = \tau^* = 0$ ,  $\nu = \omega = \tau = 0$ , а снимки  $P_1$  и  $P_2$  — высотой съемки  $H$  и  $H + \Delta H$  соответственно и углами взаимного ориентирования  $\nu^* \neq 0, \tau^* \neq 0, \tau \neq 0, \omega \neq 0, \nu \neq 0$ . Условимся также, что смежной со снимками  $P_1, P_2$  парой горизонтальных снимков, полученной в моменты  $T < T_2$ , являются снимки  $P_j, P_{j+1}$ .

С учетом изложенного рассмотрим разности параллаксов  $\Delta p = p_{\text{нш}} - p_{\text{ш}}$ ,  $\Delta q = q_{\text{нш}} - q_{\text{ш}}$  снимков  $P_1, P_2$  и  $P_1, \bar{P}_2$  (см. рис. 5). Учитывая, что

$$p_{\text{ш}} = x_j - x_{j+1} = x_1 - \bar{x}_2,$$

$$q_{\text{ш}} = y_j - y_{j+1} = y_1 - \bar{y}_2,$$

получим

$$\Delta p = (x_1 - x_2) - (x_1 - \bar{x}_2) = -x_2 + \bar{x}_2;$$

$$\Delta q = (y_1 - y_2) - (y_1 - \bar{y}_2) = -y_2 + \bar{y}_2. \quad (7)$$

Для учета отклонений центра проекции  $S_2$  от  $S_1$  по высоте и направлению полета БЛА воспользуемся известными соотношениями<sup>3</sup>, которые в соответствии с принятыми обозначениями будут иметь следующий вид:

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_2 + \delta x_{\Delta H} + \delta x_{\Delta r_c}; \quad (8)$$

$$\bar{y}_2 = \bar{y}_2 + \delta y_{\Delta H} + \delta y_{\Delta r_c}, \quad (9)$$

где  $\delta x_{\Delta H}, \delta x_{\Delta r_c}, \delta y_{\Delta H}, \delta y_{\Delta r_c}$  — поправки в координаты  $\bar{x}_2$  и  $\bar{y}_2$ ;  $\delta x_{\Delta r_c} = 0$ .

С учетом (8)–(9), известных соотношений связи плоских координат  $(x_2, \bar{x}_2), (y_2, \bar{y}_2)$  точек наклонного и горизонтального снимков, полученных из одного центра проекции, выражения (7) примут следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta p = -x_2 - \frac{fP}{c} + \delta x_{\Delta H}; \\ \Delta q = -y_2 - \frac{fQ}{c} + \delta y_{\Delta H} + \delta y_{\Delta r_c}, \end{cases} \quad (10)$$

где:  $P = a_{11}x_2 + a_{12}y_2 - a_{13}f$ ,

$$Q = a_{21}x_2 + a_{22}y_2 - a_{23}f,$$

$$C = a_{31}x_2 + a_{32}y_2 - a_{33}f,$$

$f$  — фокусное расстояние фотокамеры.

Аппроксимируем выражения (5) на основе разложений в ряд по формулам  $\sin x = x$ ,  $\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2$ ,  $\operatorname{tg} x = x$  и подставим полученные результаты в (10). Выполним далее преобразования, аналогичные представленным в работе<sup>4</sup>, и учитывая известные в теории фотограмметрии соотношения  $\delta x_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{H}x_2$ ,  $\delta y_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{H}y_2$ ,  $\delta y_{\Delta r_c} = p_{\text{ш}} \operatorname{tg} \tau^*$  и выражение  $\operatorname{tg} \tau^* = \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}$ , окончательно имеем

$$\begin{cases} \Delta p = \left(f + \frac{x_2^2}{f}\right)v + \frac{x_2 y_2}{f}\omega - y_2 \tau + x_2 \left(1 + \frac{x_2^2}{f}\right)v^2 + \\ + x_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}x_2 \tau^2 + 2\frac{x_2^2}{f^2}v\omega - 2\frac{x_2 y_2}{f}v\tau + \\ + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f}\right)\omega\tau + x_2 \frac{\Delta H}{H}; \\ \Delta q = \frac{x_2 y_2}{f}v + \left(f + \frac{y_2^2}{f}\right)\omega + x_2 \tau + y_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{x_2^2}{f^2}\right)v^2 + \\ + y_2 \left(1 + \frac{y_2^2}{f^2}\right)\omega^2 - \frac{1}{2}y_2 \tau^2 + x_2 \left(1 + 2\frac{y_2^2}{f^2}\right)v\omega + \\ + \left(x_2^2 - \frac{y_2^2}{f}\right)v\tau + 2\frac{x_2 y_2}{f}\omega\tau + y_2 \frac{\Delta H}{H} + p_{\text{ш}} \frac{\Delta r_c}{\Delta r_s}. \end{cases} \quad (11)$$

Система уравнений (11) описывает изменения параллаксов перекрывающихся изображений при возникновении отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полета и его ориентации. Модель (11) позволяет детектировать траекторию БЛА на основе сравнения априорных оценок и текущих значений разностей параллаксов смежных пар перекрывающихся снимков. При этом плоские координаты соответственных точек снимков и параллаксы в (11) должны быть выражены в миллиметрах, а углы — в радианах.

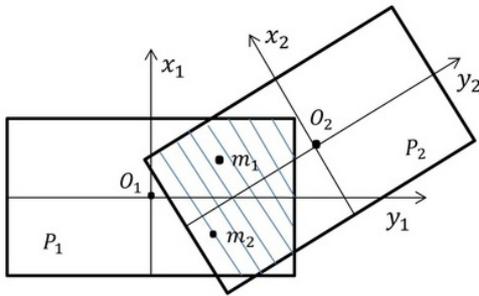
#### 4. Экспериментальные исследования

Для исследования влияния степени отклонений БЛА от заданной траектории и изменений его ориентации на уровень разностей параллаксов была сформирована пара макетных перекрываю-

<sup>3</sup> Лобанов А.Н. Фотограмметрия: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 552 с.

<sup>4</sup> Там же.

щихся снимков  $P_1, P_2$  (рис. 6) и в зоне их перекрытия заданы координаты двух соответственных точек  $m_1$  и  $m_2$  в СК снимка  $P_2$ . При этом предполагалось, что ошибки измерения отсутствуют.



**Рис. 6.** Макетные снимки  $P_1, P_2$   
**Figure 6.** Layout images  $P_1, P_2$

Параметры съемки камерой Nikon P700 [17] представлены в табл. 2, а полученные на основе модели (11) оценки влияния отклонений БЛА от заданной траектории и изменений его ориентации на уровень разностей параллаксов — в табл. 3.

Проведенный анализ полученных данных позволяет отметить следующее. Величина разности параллаксов смежных пар снимков определяется величиной изменений траектории БЛА по высоте и направлению полета, его разворотов по углам тангажа, крена и рыскания и зависит от

положения соответственных точек в зоне их перекрытия.

Характер изменений разности параллаксов имеет квазилинейный характер, поскольку квадратичные и перекрестные члены в модели (11) существенно меньше линейных слагаемых. Полученные результаты исследования позволяют по известным параметрам камеры и съемки выполнить априорную оценку пороговой величины изменений параллаксов, соответствующей допустимому уровню отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории. При этом под допустимым понимается такой уровень, который не приводит к снижению эффективности выполнения поставленной целевой задачи. Например, если положить допустимыми изменения угловой ориентации на 0,5 град., а линейные отклонения — два метра, то уровень разности продольных параллаксов при положительной и отрицательной ординате точки не должен превышать соответственно 8 и 20 пикселей, а поперечных — 40 пикселей в обоих случаях. Таким образом, выполняя измерения в процессе полета разностей параллаксов смежных пар снимков вместо измерений самих параметров ориентации БЛА, можно упростить контроль траектории БЛА в условиях потери сигналов от навигационных спутников.

Таблица 2

**Параметры съемки**

Фотоприемная структура	Принятые экспериментальные данные	
Размеры: 8 мм на 6 мм Число элементов ПЗС: 3648×2736 Размер элемента ПЗС: $2,2 \cdot 10^{-3}$ мм Фокусное расстояние: 2,4 мм	Высота съемки: $H = 285$ м Расстояние между центрами проекций $S_1$ и $S_2$ : $\Delta r_s = 95$ м Степень перекрытия снимков $P_1, P_2$ : 50%	Формат снимков $P_1, P_2$ : $-4 \text{ мм} \leq x_1, \bar{x}_2 \leq 4 \text{ мм}$ $-3 \text{ мм} \leq y_1, \bar{y}_2 \leq 3 \text{ мм}$ Параллаксы в штатном режиме съемки: $p_{ш} = 4 \text{ мм}; q_{ш} = 0$

Table 2

**Shooting Parameters**

Photodetector structure	Accepted experimental data	
Dimensions: 8 mm×6 mm Number of CCD elements: 3648×2736 The size of the CCD element: $2,2 \cdot 10^{-3}$ mm Focal length: 2,4 mm	Shooting height: $H = 285$ m Distance between projection centers $S_1$ and $S_2$ : $\Delta r_s = 95$ m Degree of overlap of images $P_1, P_2$ : 50%	Snapshot format $P_1, P_2$ : $-4 \text{ mm} \leq x_1, \bar{x}_2 \leq 4 \text{ mm}$ $-3 \text{ mm} \leq y_1, \bar{y}_2 \leq 3 \text{ mm}$ Parallaxes in normal shooting mode: $p_{ш} = 4 \text{ mm}; q_{ш} = 0$

## Результаты исследования / Research results

Разность параллаксов, мм / Parallax difference, mm	Ориентация БЛА $\nu = \tau = \omega$ , град / UAV orientation $\nu = \tau = \omega$ , °								
	0			2,5			5		
	Линейные отклонения $\Delta H = \Delta r_c$ , м / Linear deviations $\Delta H = \Delta r_c$ , m								
	0	4	8	0	4	8	0	4	8
Точка $m_1$ ( $x_2 = -2$ мм; $y_2 = 1,5$ мм) / Point $m_1$ ( $x_2 = -2$ мм; $y_2 = 1,5$ мм)									
$\Delta p_1$	0	-0,029	-0,056	0,158	0,129	0,101	0,318	0,29	0,261
$\Delta q_1$	0	0,021	0,042	0,004	0,194	0,383	0,101	0,198	0,388
Точка $m_2$ ( $x_2 = -2$ мм; $y_2 = -1,5$ мм) / Point $m_2$ ( $x_2 = -2$ мм; $y_2 = -1,5$ мм)									
$\Delta p_2$	0	-0,029	-0,056	0,279	0,251	0,222	0,542	0,513	0,485
$\Delta q_2$	0	-0,021	-0,042	0,111	0,258	0,406	0,217	0,365	0,512

**Заключение**

1. Разработана модель, устанавливающая функциональную связь между разностями продольного и поперечного параллаксов смежных пар перекрывающихся снимков и величиной линейных отклонений БЛА от заданной траектории горизонтального полета и изменений его угловой ориентации.

2. Полученные аналитические соотношения позволяют выполнить априорную оценку пороговой величины изменений параллаксов, соответствующей допустимому уровню отклонений БЛА от заданной горизонтальной траектории, и в условиях потери сигналов от навигационных спутников обеспечивают возможность автоматического детектирования траектории БЛА без непосредственного измерения параметров полета.

**Список литературы**

1. Веремеенко К.К., Антонов Д.А., Жарков М.В., Зимин Р.Ю., Кузнецов И.М., Пронькин А.Н. Интегрированная система ориентации и навигации БПЛА // Новости навигации. 2011. № 4. С. 22–28. EDN: RBHKYZ
2. Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Соловьев Ю.А. Анализ состояния разработок, интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32–41. EDN: RBGRIF
3. Кузнецов И.М., Пронькин А.Н., Веремеенко К.К. Малогабаритные интегрированные навигационные модули: алгоритмы и особенности структуры // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3(104). С. 245–250. EDN: LMCOZF

4. Пронькин А.Н., Кузнецов И.М., Веремеенко К.К. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик // Труды МАИ. 2010. № 41. С. 14. EDN: NCGDBJ

5. Arulmurugan L., Raghavendra Prabhu S., Ilankumaran M., Suresh V., Saravanakumar R.R., Raghunath M. Kinematics and plane decomposition algorithm for non-linear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 995(1). Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>

6. Hosseini K., Ebadi H., Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. № 48 (12). P. 1675–1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

7. Kikutis R., Stankūnas J., Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms // Transport. 2019. № 34 (6). P. 652–661. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11741>

8. Luo S., Liu H., Hu M., Dong J. Review of multimodal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle // Guofang Keji Daxue Xuebao/Journal of National University of Defense Technology. 2020. Vol. 42. № 6. P. 1–10.

9. Салычев О.С. Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой — основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. URL: [https://www.academia.edu/26013627/Uav\\_autopilot\\_salychev](https://www.academia.edu/26013627/Uav_autopilot_salychev) (дата обращения: 15.02.2023).

10. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Лунев Е.М., Пронькин А.Н. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на

базе фотоизображения и инерциальных измерений // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 14. EDN: XEQWYZ

11. Андронов В.Г., Чуев А.А., Князев А.А. Определение и оценка уровня отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по изображениям подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. № 1 (12). С. 129–144. <https://doi.org/10.21869/2223-15362022-12-1-129-144>.

12. Олейник И.И., Черноморец А.А., Андронов В.Г., Жиликов Е.Г., Заливин А.Н., Мухин И.Е., Чуев А.А. Малогабаритные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения. Курс: Юго-Западный государственный университет, 2021. 171 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46554248> (дата обращения: 15.02.2023).

13. Ардентов А.А., Бесчастный И.Ю., Маштаков А.П., Попов А.Ю., Сачков Ю.Л., Сачкова Е.Ф. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3. № 3 (12). С. 23–38.

14. Гермак О.В. Определение элементов взаимного ориентирования снимков // Интернет-журнал Науковедение. 2012. № 4 (13). С. 150.

15. Добрынин Н.Ф., Пимшина Т.М. Взаимное ориентирование аэроснимков с новым сочетанием угловых элементов в стереопаре // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2 (29). С. 43.

16. Коришунов Р.А., Носков В.В., Погорелов В.В. Центральная обратная фотограмметрическая засечка // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 5. С. 67–71.

17. Раков Д.Н., Никитин В.Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 7. С. 27–36. EDN: QITTPR

## References

1. Veremeenko KK, Antonov DA, Zharkov MV, Zimin RYu, Kuznetsov IM, Pronkin AN. Integrated UAV orientation and navigation system. *Navigation News*. 2011;4:22–28. (In Russ.) EDN: RBHKYZ

2. Veremeenko KK, Koshelev BV, Soloviev YA. The analysis of development of the integrated inertial & satellite navigation systems. *Navigation News*. 2010;4:32–41. (In Russ.) EDN: RBGRIF

3. Kuznetsov IM, Pronkin AN, Veremeenko KK. Small-sized integrated navigation modules: algorithms and structural features. *News of the SFU. Technical sciences*. 2010; 3(104):245–250. (In Russ.) EDN: LMCOZF

4. Pronkin AN, Kuznetsov IM, Veremeenko KK. Integrated UAV navigation system: structure and research of characteristics. *Trudy MAI [Proceedings of MAI]*. 2010; 41:14. (In Russ.) EDN: NCGDBJ

5. Arulmurugan L, Raghavendra Prabhu S, Ilankumar M, Suresh V, Saravanakumar RR, Raghunath M. Kinematics and plane decomposition algorithm for nonlinear path planning navigation and tracking of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;995(1):012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/995/1/012019>

6. Hosseini K, Ebadi H, Farnood Ahmadi F. Determining the location of UAVs automatically using aerial or remotely sensed high-resolution images for intelligent navigation of UAVs at the time of disconnection with GPS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2020;48(12):1675–1689. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01187-4>

7. Kikutis R, Stankūnas J, Rudinskas D. Autonomous unmanned aerial vehicle flight accuracy evaluation for three different path-tracking algorithms. *Transport*. 2019; 34(6):652–661. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11741>

8. Luo S, Liu H, Hu M, Dong J. Review of multimodal image matching assisted inertial navigation positioning technology for unmanned aerial vehicle. *Guofang Keji Daxue Xuebao/Journal of National University of Defense Technology*. 2020;42(6):1–10.

9. Salychev OS. UAV autopilot with an Inertial Integrated System is the basis for the safe operation of unmanned complexes. Available from: [http://www.teknol.ru/trash/uav\\_autopilot\\_salychev\\_2602182965.pdf](http://www.teknol.ru/trash/uav_autopilot_salychev_2602182965.pdf). (In Russ.) (accessed: 15.02.2023).

10. Antonov DA, Zharkov MV, Kuznetsov IM, Lunev EM, Pronkin AN. Unmanned aerial vehicle positioning based on photographic image and inertial measurements. *Trudy MAI [Proceedings of MAI]*. 2016;91:14. (In Russ.) EDN: XEQWYZ

11. Andronov VG, Chuev AA, Knyazev AA. Determination and assessment of the level of deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory from images of the underlying surface. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;1(12):129–144. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-129-144>

12. Oleinik II, Chernomorets AA, Andronov VG, Zhilyakov EG, Zhalivin AN, Mukhin IE, Chuev AA. *Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them*. Kursk: Southwest State University; 2021. (In Russ.) Available from: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_46554248\\_69730965.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_46554248_69730965.pdf) (accessed: 15.02.2023)

13. Ardentov AA, Beschastny IYu, Mashtakov AP, Popov AYU, Sachkov YuL, Sachkova EF. Algorithms for evaluation position and orientation of UAV. *Program systems: Theory and applications*. 2012;3(3(12):23–38. (In Russ.)

14. Germak OV. Determination of elements of mutual orientation of images. *Online journal of Science Studies*. 2012;4(13):150. (In Russ.)

15. Dobrynin NF, Pimshina TM. Mutual orientation of aerial photographs with a new combination of angular elements in a stereo pair. *Engineering Bulletin of the Don*. 2014;2(29):43. (In Russ.)

16. Korshunov RA, Noskov VV, Pogorelov VV. Non-central reverse photogrammetric notch. *News of higher*

*educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2013;5:67–71. (In Russ.)

17. Rakov DN, Nikitin VN. The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex. *Interexpo Geo-Siberia*. 2012;7:27–36. (In Russ.) EDN: QITTPR.

#### Сведения об авторах

**Андронов Владимир Германович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи, факультет фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2578-0026; E-mail: vladia58@mail.ru

**Чуев Андрей Алексеевич**, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, факультет фундаментальной и прикладной информатики, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2980-0533; E-mail: chuev-aa@inbox.ru

**Дубровский Никита Сергеевич**, студент, юридический факультет, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1261-1928; E-mail: dubrovsky69@icloud.com

#### About the authors

**Vladimir G. Andronov**, D.Sc., Senior Researcher, Head of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2578-0026; E-mail: vladia58@mail.ru

**Andrey A. Chuev**, Lecturer, Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2980-0533; E-mail: chuev-aa@inbox.ru

**Nikita S. Dubrovsky**, Student, Faculty of Law, Southwest State University, Kursk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1261-1928; E-mail: dubrovsky69@icloud.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-223-232  
EDN: VACPYU  
УДК 004.042

Научная статья / Research article

## Исследование потоков информации в транкинговой радиосети для операций наземного обслуживания воздушных судов

А.В. Ильченко<sup>a</sup> , Т.Е. Ильченко<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Российская Федерация

<sup>b</sup> ООО «АФЛТ-Системс», Москва, Российская Федерация  
✉ ilchenkoav@mai.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 12 апреля 2023 г.  
Доработана: 10 июля 2023 г.  
Принята к публикации: 15 июля 2023 г.

### Ключевые слова:

транспорт, гражданская авиация, воздушное судно, радиосети, коммуникации, технологический график, безопасность, спасение, анализ

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Аннотация.** Исследованы информационные потоки систем коммуникаций при проведении операций по наземному обслуживанию воздушных судов в одном из крупнейших аэропортов Российской Федерации для определения минимально достаточного ресурса системы радиосвязи как одного из каналов коммуникаций. Приведен технологический график обслуживания воздушного судна и на его примере показана сложность и параллелизм процессов обслуживания воздушного судна. Также на основе технологического графика обслуживания разработан список необходимых ресурсов коммуникации с описанием конкретных работ каждой группы и их ожидаемой загрузки. Описаны три этапа исследования для модернизации коммуникаций. На первом этапе установлены доступные и необходимые условия для функционирования систем коммуникаций в условиях нехватки частотного ресурса и определена технология связи, которая будет внедрена (в данном случае шла речь о строительстве DMR Tier III радиосети). На втором этапе накоплена статистика использования радиосети, проанализированы конкретные задачи, работа групп, их радиобмен. На третьем этапе на основе данных, полученных ранее, сделан вывод о тех или иных слабых местах системы, выработаны рекомендации к ее модификации для снижения количества отказов в обслуживании абонентов и повышения эффективности работ по наземному обслуживанию воздушных судов, а также для работы аварийных и служб безопасности. В исследовании отражены несколько ключевых показателей, а именно: доступность каналов связи, количество каналов связи для исполнения технологического графика обслуживания, удержание канала связи, а также строгое соблюдение регламента переговоров.

### Для цитирования

Ильченко А.В., Ильченко Т.Е. Исследование потоков информации в транкинговой радиосети для операций наземного обслуживания воздушных судов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 223–232. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-223-232>

© Ильченко А.В., Ильченко Т.Е., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Information flows research in trunked radio network for aircraft ground handling operations

Andrey V. Ilchenko<sup>a</sup>  , Tatiana E. Ilchenko<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup>LLC “AFLT Systems”, Moscow, Russian Federation

 ilchenkoav@mai.ru

### Article history

Received: April 12, 2023

Revised: July 10, 2023

Accepted: July 15, 2023

### Keywords:

transport, civil aviation, aircraft, radio networks, communications, technological schedule, safety, rescue, analysis

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### For citation

Ilchenko AV, Ilchenko TE. Information flows research in trunked radio network for aircraft ground handling operations. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):223–232. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-223–232>

### Введение

Проблема обеспечения критических коммуникаций для обеспечения наземного обслуживания воздушных судов весьма актуальна, так как от работы средств связи зависит не только качество наземного обслуживания, но и жизнь людей [1–2]. Именно поэтому системы радиосвязи отнесены к объектам критической инфраструктуры, проводятся соответствующие законодательству процедуры категорирования. В целом в Российской

Федерации частотный ресурс, который используется для организации внутрипортовой радиосвязи весьма ограничен. Это или полоса 136–174 МГц, или 430–440 МГц для систем DMR, или полосы стандарта TETRA. Однако в соответствии с решением ГКРЧ<sup>1</sup> в Московском регионе диапазон TETRA 422–427 запрещен, а от диапазона 450 МГц решением (протокол № 14–26) оставлена полоса всего лишь 2 МГц<sup>2</sup>. Вместе с тем проблема обеспечения коммуникаций для наземного обслуживания остается актуальной именно в указанных

<sup>1</sup> Протокол заседания Государственной комиссии по радиочастотам № 06–15 от 26.06.2006. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/4044/> (дата обращения: 15.03.2023).

<sup>2</sup> Решение ГКРЧ от 22 июля 2014 года № 14-26-05-3 «Об использовании полос радиочастот 453-457,4 МГц и 463-467,4 МГц радиоэлектронными средствами стандарта IMT-МС-450 и стандарта LTE и последующих его модификаций». URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/4224/> (дата обращения: 21.03.2023).

диапазонах. В последнее время были попытки перевести операции на технологии LTE МСРТТ, РоС, но в связи с жесткими требованиями по доступности каналов связи они не могут заменить технологии TETRA и DMR.

Практически все исследования по данной теме посвящены только вопросам рассмотрения различных технологий [3], радиочастотного планирования [4]. А.В. Ильченко неоднократно обращался к вопросу регулирования использования радиосредств, в частности, при проведении массовых мероприятий [5]. Вместе с тем авторы считают, что при безусловной важности радиочастотного обеспечения и расчетов необходимо исследовать сами потоки информации, циркулирующей в радиосети при выполнении операций наземного обслуживания рейсов и воздушных судов в аэропорту, чтобы определить оптимальный частотный ресурс и технологии радиосвязи. Интересна также специфика исследований в смежных областях. Например, при рассмотрении построения полевых мультисервисных сетей передачи данных в зонах ЧС и иных спасательных работ авторы описывают схожие сложности с переходом от применяемых в настоящее время TETRA и DMR к наиболее соответствующим современным требованиям по высокоскоростной передаче данных [6–7].

Также следует отметить повышенное внимание авторов к моделированию распространения радиоканалов, в [8–10] рассматривается возможность обеспечения покрытия беспроводной сети, а также связанные проблемы при работе с коммуникационными системами, результаты работы с которыми могут быть также полезны при рассмотрении тематики. В части исследований, касающихся непосредственно наземного обслуживания воздушных судов в аэропорту, подавляющее большинство публикаций посвящено вопросам экономической эффективности и оптимизации ресурсов — персонала, оборудования и спецтехники, например [11–16], также немалую часть занимают работы, затрагивающие тематику так называемых умных аэропортов, например [17–22], однако практически отсутствуют работы, в которых бы исследовались последовательности операций и информационное взаимодействие при их проведении.

**Цель исследования** — изучение потоков информации при наземном обслуживании воздушных судов, выявление проблем в связи с растущей

нагрузкой и определение оптимального количества ресурсов и уровень доступности, необходимых для безотказной работы всех задействованных служб аэропорта.

## 1. Выявление основных потоков информации

Системы радиосвязи в гражданской авиации используют полосу в диапазоне 160 МГц, которая в 70–80-е гг. прошлого века удовлетворяла всем требованиям обеспечения производства и безопасности полетов, обслуживания пассажиров, багажа, грузов и почты, однако в 20-х гг. нынешнего столетия уже не соответствует современным требованиям ни по пропускной способности, ни по защищенности. Конечно, в последнее время назначения частот Роскомнадзором весьма расширены (автор получал разрешения даже в районе 146–148 МГц), но это не решает проблему недостаточности частотного ресурса на определенных территориях и в условиях повышенной плотности эксплуатируемых радиосредств и ограничений, накладываемых Министерством обороны Российской Федерации.

Также для использования в гражданской авиации доступен диапазон 410–450 МГц, предназначенный в том числе для любительской и сухопутной подвижной радиослужб. При этом последняя включает полосы для устройств малого радиуса действия, а также для радиостанций типа Walkie Talkie, не требующих лицензирования. Такие устройства могут вызвать нарушения в связи, которые очень сложно идентифицировать поскольку в последнее время конечному потребителю доступен обширный ассортимент радиосредств общего назначения, использующих большой спектр радиочастот.

С учетом изложенного выше исследование и оптимизация информационных потоков в связке «персонал — информационные системы — системы радиосвязи» в аэропорту представляется перспективным способом решения проблем с предоставлением качественного сервиса радиосвязи и улучшения коммуникаций между задействованными в процессах наземного обслуживания службами. Взаимное влияние между информационными системами по обслуживанию воздушных судов, пассажиров, багажа, груза, почты (производственными системами), а также — другими системами аэропорта и сетью радио-

связи неоспоримо. В случае отказа производственной информационной систем значительно возрастает нагрузка на радиосеть. Справедливо и обратное — отказ радиосвязи приводит к росту нагрузки на персонал и производственные системы. Именно поэтому авторами проведено исследование процессов и операций наземного обслуживания в аэропорту, потоки информации и их взаимодействие.

Наземное обслуживание воздушного судна в аэропорту — набор обязательных операций, которые должны быть выполнены от момента прибытия воздушного судна на место стоянки до его отправления в соответствии с расписанием и суточным планом полетов авиакомпании и аэропорта. Такое обслуживание осуществляется в соответствии с принятыми в каждом аэропорту технологическими графиками обслуживания (ТГО). Все операции ТГО можно разделить на следующие виды:

- ✓ техническое обслуживание воздушного судна;
- ✓ наземное обслуживание воздушного судна;
- ✓ обслуживание пассажиров и багажа;
- ✓ обработка грузов и почты.

Объем и состав операций, выполняемых в рамках ТГО, зависит от вида сообщения для рейса (прибывающего или отправляющегося в/из аэропорта). Так, например, при встрече рейса, прибывающего по МВЛ (международные воздушные линии), на место стоянки прибывают представители служб пограничного контроля и таможни. А в случае наличия на борту оружия должны также присутствовать представители Министерства внутренних дел и/или Росгвардии.

Кроме того, ТГО подразделяются относительно направления и объема выполняемых операций на следующие виды:

- ✓ обслуживание по прилету рейса (конечный ТГО) — от прибытия ВС, выполняющего рейс в аэропорт как пункт назначения, на место стоянки до выполнения последней операции (например, окончания обработки груза/почты);
- ✓ обслуживание по вылету рейса (начальный ТГО) — от прибытия ВС, выполняющего рейс из аэропорта как пункта отправления, до отправления с места стоянки (точки запуска двигателей — в зависимости от сезона, необходимости и места проведения противообледенительной обработки);

- ✓ оборотный или транзитный ТГО (прилет/вылет) — обслуживание ВС от прилета до вылета как сумма всех операций, ограниченных временным отрезком от прибытия до отправления ВС, выполняющего пару рейсов — прилетной и вылетной.

Каждая технологическая операция выполняется в строгом соответствии с требованиями, указанными в технологических картах и инструкциях, разрабатываемых операторами наземного обслуживания в соответствии с видом работ и с учетом требований руководств по наземному обслуживанию авиакомпаний.

Во время обслуживания одного рейса параллельно выполняются несколько операций. Пример ТГО приведен в табл. 1.

Проблемы прохождения информации от одного участника процесса к другому в процессе обслуживания воздушного судна обусловлены такими факторами, как:

- ✓ количество одновременно обслуживаемых рейсов и проводимых операций в процессе наземного обслуживания;
- ✓ конфигурация аэродрома, перрона и комплекса зданий и сооружений на территории аэропорта;
- ✓ используемые для координации и выполнения операций помещения в цокольных или подвальных этажах терминалов аэропорта или в отдаленных от места обслуживания зданиях;
- ✓ наличие радионепрозрачных сооружений и препятствий для радиосигнала на перроне (спецтехника, воздушные суда, ангары и т.п.).

Также большое значение имеет уровень сервиса — время предоставления канала связи со стороны инфраструктуры.

С учетом упомянутых выше факторов, а также в соответствии с типовыми ТГО представляется целесообразным выделить следующие потоки информации (виды каналов управления):

- ✓ управление производством и/или аэропортом (координация производственной деятельности, выполнение суточного плана полетов и расписания аэропорта, слот-координация, управление наземным движением воздушных судов и т.д.);
- техническое обслуживание воздушного судна в рамках ТГО (авиационные механики, инженеры по обслуживанию воздушных судов и/или супервайзеры под бортом, диспетчеры по организации перевозок на перроне);

Таблица 1

## Типовой технологический график

№	Операция	Начало	Окончание	Продолжительность
1	Прибытие ВС	0:45	0:35	0:10
2	Авиационная безопасность	0:35	0:00	0:35
3	Установка колодок	0:35	0:34	0.01
4	Подгон первого трапа	0:34	0:32	0.02
5	Открытие грузовых люков	0:34	0:32	0:02
6	Подгон второго трапа	0:34	0:32	0:02
7	Разгрузка багажа	0:32	0:21	0:11
8	Высадка пассажиров	0:32	0:26	0:06
9	Подъезд топливозаправщика	0:34	0:27	0:07
10	Заправка топливом	0:26	0:14	0:12
11	Готовность ВС	0:20	0:19	0:01
12	Посадка пассажиров в ВС	0:14	0:02	0:12
13	Загрузка багажа	0:16	0:04	0:12
14	Доставка перевозочной документации	0:07	0:05	0:02
15	Прибытие тягача	0.07	0:05	0:02
16	Заккрытие грузовых люков	0:04	0:02	0:02
17	Заккрытие пассажирских дверей	0:02	0:01	0:01
18	Отгон первого трапа	0:02	0:01	0:02
19	Отгон второго трапа	0:02	0:01	0:02
20	Уборка колодок, отправление	0:01	0:00	0:01
21	Буксировка ВС	0:00	-0:03	0:03

Table 1

## Typical technological schedule

No.	Operation	Begin	End	Duration
1	Departing Aircraft	0:45	0:35	0:10
2	Aviation Safety operations	0:35	0:00	0:35
3	Cutters install	0:35	0:34	0.01
4	Landing 1 <sup>st</sup> ramp	0:34	0:32	0.02
5	Opening Cargo Doors	0:34	0:32	0:02
6	Landing 2 <sup>nd</sup> ramp	0:34	0:32	0:02
7	Baggage Unloading	0:32	0:21	0:11
8	Passengers Unloading	0:32	0:26	0:06
9	Fuel Tanker Entrance	0:34	0:27	0:07
10	Fuelling	0:26	0:14	0:12
11	Aircraft Readiness	0:20	0:19	0:01
12	Passengers Loading	0:14	0:02	0:12
13	Baggage Loading	0:16	0:04	0:12
14	Flight Docs delivery	0:07	0:05	0:02
15	Tractor arrival	0.07	0:05	0:02
16	Cargo Doors closing	0:04	0:02	0:02
17	Passenger Doors Closing	0:02	0:01	0:01
18	1 <sup>st</sup> ramp driving away	0:02	0:01	0:02
19	2 <sup>nd</sup> ramp driving away	0:02	0:01	0:02
20	Cutters remove	0:01	0:00	0:01
21	Aircraft towing	0:00	-0:03	0:03

✓ наземное обслуживание воздушного судна (водители спецтранспорта и средств наземного обслуживания, тягачи аэродромные, буксировочные устройства, топливозаправщики, машины для доставки бортового питания, машины для проведения противообледенительной обработки ВС и т.д.);

✓ обслуживание пассажиров (стойки регистрации, выходы на посадку, персонал — агенты регистрации, посадки и обслуживания транзитных пассажиров, пассажирские и экипажные автобусы, амбулифты и персонал для обслуживания пассажиров с ограниченными возможностями здоровья и т.п.);

✓ обработка багажа (персонал, погрузчики контейнерные, комплектовка багажа, загрузка/выгрузка, транспортеры ленточные, тягачи багажных тележек и контейнеров и т.п.);

✓ обработка груза/почты (персонал, погрузчики контейнерные, комплектовка грузов и почты, загрузка/выгрузка, транспортеры ленточные, тягачи багажных тележек и контейнеров);

✓ прочие производственные операции и управление аэродромной территорией, перроном, зданиями и сооружениями аэропорта.

## 2. Поэтапное исследование потоков

Исследование потоков проводилось в одном из крупнейших аэропортов Российской Федерации в два этапа, которые совпали с реализацией проекта по модернизации существующей системы радиосвязи. На первом этапе исследования при проведении проектного обследования инфраструктуры аэропорта в целях модернизации существующей системы радиосвязи были изучены доступные ресурсы для ее функционирования. Модернизируемая система радиосвязи эксплуатируется при выполнении операций наземного обслуживания воздушных судов, пассажиров, обработки багажа, груза и почты, а также для обеспечения авиационной и транспортной безопасности, поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов. В результате проектного обследования с учетом существующих радиочастотных разрешений и конструкции имеющихся антенно-фидерных устройств определена целевая архитектура система радиосвязи, в которой за основу принят стандарт DMR Tier III. Расчеты радиосети сделаны по методикам компаний-производителей оборудования и программного обеспечения.

На втором этапе исследования, проводимом на модернизированной системе, при помощи программного обеспечения CMSS Data Converter [8], разработанного одним из авторов, были проанализированы радиообмены между центром управления производством (диспетчером) и исполнителями (абонентами радиосети) в различных разговорных группах, их количество, средняя продолжительность и качество. Данное программное обеспечение преобразует сырые данные, полученные с контроллеров транкинговой радиосети, в базу данных, а затем их анализирует по заданным критериям. В частности, в базу данных записывается следующая информация: дата и время события, относительное время в миллисекундах, источник вызова (абонент), назначение вызова (группа), уникальный номер сессии, тип вызова, действие, сайт-инициатор, уровень сигнала при вызове, идентификатор сайта, на котором зарегистрирован абонент, идентификатор ретранслятора, номер тайм-слота, номер логического канала, дополнительная информация. Программное обеспечение анализирует события и строит отчеты в различных аналитических разрезах: регистрация и разрегистрация абонентов, групповые и индивидуальные вызовы для передачи голоса или данных, прерывания групповых вызовов и др. Таким образом были проанализированы массивы данных в части количества сеансов связи, качества сигнала, скорости предоставления канала связи, участников радиообмена. С помощью подобных отчетов можно установить, например, что емкость сайта N (или базовой станции) недостаточна, а сайта M — избыточна. Это позволяет выработать рекомендации по их реконфигурации, а также оценить такие параметры, как качество связи и доступность каналов (детектирование наличия очередей).

Приведем пример одной сессии, в рамках которой производится радиообмен между диспетчером и местом стоянки ВС внутри одной разговорной группы. Количество включений внутри сессии — 4: «Стоянка 1, ответьте» — «я 1, отвечаю» — «примите задание» — «принял». В более сложных случаях требуются дополнительные разъяснения или уточнения как со стороны диспетчера, так и со стороны агента. Минимальное время занятия радиоканала (группы) составляет 1 минуту, среднее 3 минуты, максимальное 10 минут.

Путем анализа накопленной статистики по всем группам выявлены как недостатки отсутствия стандартизации коммуникаций, так и недостатки системы радиосвязи, спроектированной только по расчетам ЭМС:

✓ несоблюдение персоналом фразеологии радиообмена, затягивание переговоров, обсуждение не относящихся к выполняемой операции вопросов;

✓ чрезмерное количество участников в группе — по данным статистического анализа определено, что для обеспечения эффективного радиообмена количество абонентов в разговорной группе не должно превышать 100–120, а превышение этого количества потенциально может привести к нарушениям времени выполнения операций ТГО и, соответственно, к задержке отправления рейса в связи с недоступностью одного из участников процесса;

✓ выявлены абоненты и группы абонентов, которые не соответствуют своим функциям и генерируют дополнительную нагрузку на радиосеть;

✓ недостаточность количества каналов, доступных на базовых станциях, когда при превышении количества разговорных групп выше определенного проектом предела вызовы помещаются в очередь, что негативно сказывается на соблюдении параметров операций в рамках производственных процессов аэропорта.

Среднее время сессии для каждой функциональной группы абонентов, взаимодействующих при выполнении операций в рамках ТГО (в нормальном режиме вне периодов пиковой нагрузки, без аварийных и/или сбойных ситуаций) приведено в табл. 2.

Авторами также экспериментальным путем установлено, что время удержания логического канала не должно превышать 4 секунды — при меньшем времени текущая сессия завершится, будет открыта новая, что при значительном количестве абонентов и групп приведет к повышению общей нагрузки на систему, а при большем — повышается вероятность отказа в обслуживании для других абонентов в силу недостаточности количества каналов, упомянутой выше.

Таблица 2

Среднее время сессии при ТГО

№ п/п	Функциональная группа	Количество групп, шт.	Среднее время сессии, мин
1	Инженер по обслуживанию ВС	1	2
2	Авиамеханики	1	2
3	Обработка багажа	1	4
4	Самоходный трап	1	1
5	Пассажиры и пассажиры ОВЗ	2	2
6	Вода/Химия/Ассенизация	2	1
7	Пассажирские автобусы	2	2
8	Топливозаправщики	1	1
9	Аэродромные тягачи / Буксировка ВС	2	2
10	Доставка средств наземного обслуживания	1	2
11	Противообледенительная обработка ВС	1	4

Table 2

Average session time with the technological maintenance schedule

No. п/п	Functional group	Number of groups, pcs	Average session time, min
1	Aircraft Maintenance Engineer	1	2
2	Aircraft mechanics	1	2
3	Handling luggage	1	4
4	Self-propelled ramp	1	1
5	Passengers and passengers with disabilities	2	2
6	Water/Chemistry/Sewage disposal	2	1
7	Passenger buses	2	2
8	Tankers	1	1
9	Airfield tractors / Aircraft towing	2	2
10	Delivery of ground-handling	1	2
11	Aircraft Anti-Icing treatment	1	4

Таким образом, для обеспечения коммуникаций при проведении наземного обслуживания в аэропорту необходимо не менее 15 разговорных групп, не считая аварийного канала (ПАСОП), каналов служб авиационной и транспортной безопасности.

## Заключение

На основе проведенного исследования можно заключить, что потоки информации в операциях наземного обслуживания воздушных судов представляют собой разветвленный граф с применением всех имеющихся средств коммуникаций: радиосвязи, проводной телефонной связи, мобильной связи, локальной вычислительной сети, мобильного интернета, мессенджеров, электронной почты, систем оперативной связи (интеркомов) и т.д. Однако радиосвязь считается наиболее удобным способом оперативной коммуникации. Приведен типовой радиообмен центра управления со стоянкой воздушного судна, который характеризуется высокой требовательностью к доступности радиоканала.

В ходе исследования установлены экспериментально следующие параметры для потоков управления наземным обслуживанием воздушных судов:

- доступность канала связи должна составлять 97 %, что не противоречит заданным параметрам транкингового режима DMR Tier III;
- количество каналов связи (групп) в целях наземного обслуживания воздушных судов — минимум 15, но при наличии более одного терминала это значение может быть увеличено вдвое. Однако при эксплуатации базовых станций (сайтов) различной канальности необходимо предусмотреть компенсационные механизмы;
- анализ переговоров показал необходимость строгого соблюдения регламента переговоров;
- удержание вызова в канале связи не должно превышать более 4 секунд;
- существующие системы могут обеспечить доступность каналов и бесперебойное функционирование всех групп абонентов при достаточном частотном ресурсе и планировании радиосети.

## Список литературы

1. *Tabassum A., He B.* Dynamic control allocation between onboard and delayed remote control for unmanned aircraft system detect-and-avoid // *Aerospace Science and*

*Technology*. 2022. Vol. 121. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107323>

2. *Palacios R., Hansman J.* Shortterm consequences of radio communications blackout on the U.S. National Airspace System // *Aerospace Science and Technology*. 2013. Vol. 29. Issue 1. P. 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2013.04.012>

3. *Васильев В.Н., Григорьев В.А., Хворов И.А., Раснаев Ю.А.* Системы связи на транспорте: тенденции развития и задачи регулирования // *Электросвязь*. 2016. № 2. С. 18–23. EDN: VOCABB

4. *Демичев М.С., Гаипов К.Э., Демичева А.А., Нарожный А.И.* Радиочастотное планирование радиосети с исключением интерференции радиоволн // *Кибернетика и программирование*. 2017. № 4. С. 1–23. EDN: ZFIDJJ

5. *Ильченко А.В., Бутакова М.А., Лабунько О.С.* Метод управления оперативной радиосвязью при проведении Гран-при России «Формулы 1» // *Электросвязь*. 2018. № 6. С. 49–52. EDN: XQLDJJ

6. *Бедило М.В., Олейников В.Т., Петренко А.Н., Страховис А.А.* Технология построения полевой мультисервисной сети передачи данных на местах тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ // *Технологии гражданской безопасности*. 2022. № 2 (72). С. 31–36. EDN: BSDXGY

7. Перспективы внедрения широкополосных сервисов в сетях профессиональной мобильной радиосвязи на основе LTE. URL: <http://www.nnit.ru/analytics/a157764/> (дата обращения: 24.03.2023).

8. *Ahmad A., Cheema A.A., Finlay D.* A survey of radio propagation channel modelling for low altitude flying base stations // *Computer Networks*. 2020. Vol. 171. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107122>

9. *Tuna G., Nefzi B., Conte G.* Unmanned aerial vehicleaided communications system for disaster recovery // *Journal of Network and Computer Applications*. 2014. Vol. 41. P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2013.10.002>

10. *Gulfam S.M., Nawaz S.J., Ahmed A., Patwary M.N.* Angle and time of arrival characteristics of 3D air-to-ground radio propagation environments // *Computer Communications*. 2017. № 112. P. 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.08.011>

11. *Ларкович М.А., Дороничев А.В.* Цифровое управление технологическими процессами наземного обслуживания воздушных судов // *Научно-техническому и социально-экономическому развитию Дальнего востока России — инновации молодых: тезисы докладов 80-й Межвузовской студенческой научно-практической конференции: в 2 т. Т. 1 / под ред. А.З. Ткаченко. Хабаровск, 2022. С. 135. EDN: LKZGXP*

12. *Tabares D.A., Mora-Camino F., Drouin A.* A multi-time scale management structure for airport ground handling automation // *Journal of Air Transport Management*. 2021. Vol. 90. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101959>

13. Chen S.-T., Ermiş G., Sharpanskykh A. Multi-agent planning and coordination for automated aircraft ground handling. *Robotics and Autonomous Systems* // *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 167. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104480>

14. Adler N., Brudner A., Gallotti R., Privitera F., Ramasco J.J. Does big data help answer big questions? The case of airport catchment areas & competition // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2022. Vol. 166. P. 444–467. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.10.013>

15. Andreatta G., De Giovanni L., Michele Monaci M. A Fast Heuristic for Airport Ground-Service Equipment-and-Staff Allocation // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 108. P. 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.817>

16. Fitouri-Trabelsi S., Cosenza C.A.N., Mora-Cami F. Ground Handling Management at Airports with Fuzzy Information // *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. Vol. 46. P. 373–378. <https://doi.org/10.3182/20130911-3-BR-3021.00016>

17. Liu X., Wang Q., Zou C., Yu M., Liao D. Edge Intelligence for Smart Airport Runway: Architectures and Enabling Technologies // *Computer Communications*. 2022. Vol. 195. P. 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.09.003>

18. Ma J., Chen X., Xing Z., Zhang Y., Yu L. Improving the performance of airport shuttle through demand-responsive service with dynamic fare strategy considering mixed demand // *Journal of Air Transport Management*. 2023. Vol. 112. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102459>

19. Kalakou S., Psaraki-Kalouptsi V., Moura F. Future airport terminals: New technologies promise capacity gains // *Journal of Air Transport Management*. 2015. Vol. 42. P. 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.10.005>

20. Malik H., Tahir S., Tahir H., Ihtasham M., Khan F. A homomorphic approach for security and privacy preservation of Smart Airports // *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 141. P. 500–513. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.12.005>

21. Kovacikova K., Novak A., Kovacikova M., Sedlackova A.N. Smart parking as a part of Smart airport concept // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 65. P. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.11.009>

22. Rubio-Andrada L., Celemín-Pedroche M.S., Escat-Cortes M.-D., Jimenez-Crisostomo A. Passengers Satisfaction with The Technologies Used in Smart Airports: An Empirical Study from A Gender Perspective // *Journal of Air Transport Management*. 2023. Vol. 107. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102347>

23. Ильченко А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020662503 Российская Федерация. CMSS Data Converter. Конвертер данных CMSS: № 2020661140: заявл. 28.09.2020; опубл. 14.10.2020.

## References

1. Tabassum A, He B. Dynamic control allocation between onboard and delayed remote control for unmanned aircraft system detect-and-avoid. *Aerospace Science and Technology*. 2022;121:107323. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107323>

2. Palacios R, Hansman J, Short-term consequences of radio communications blackout on the U.S. National Airspace System. *Aerospace Science and Technology*. 2013;29:426–433. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2013.04.012>

3. Vasilev VN, Grigoriev VA, Khvorov IA, Raspaev YuA. Communication systems in transport: development trends and regulation tasks. *Elektrosvyaz*. 2016; 2:18–23. (In Russ.) EDN: VOCABB

4. Demichev MS, Gaipov KE, Demicheva AA, Narozhny AI. Radio frequency planning of a radio network with the exclusion of radio wave interference. *Cybernetics and Programming*. 2017;4:1–23. (In Russ.) EDN: ZFIDJJ

5. Ilchenko AV, Butakova MA, Labunko OS. Operational radio communication control method during the Formula 1 Russian Grand Prix. *Elektrosvyaz*. 2018;6:49–52. (In Russ.) EDN: XQLDJJ

6. Bedilo MV, Oleinikov VT, Petrenko AN, Strakhov AA. Technology for constructing a field multi-service data transmission network at fire extinguishing and emergency rescue operations. *Civil Security Technologies*. 2022;2(72):31–36. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=48679004>

7. Prospects for the introduction of broadband services in professional mobile radio networks based on LTE. (In Russ.) Available from: <http://www.nnit.ru/analytics/a157764/> (accessed: 24.03.2023).

8. Ahmad A, Cheema AA, Finlay D. A survey of radio propagation channel modelling for low altitude flying base stations. *Computer Networks*. 2020;171:107122. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107122>

9. Tuna G, Nefzi B, Conte G. Unmanned aerial vehicle-aided communications system for disaster. *Journal of Network and Computer Applications*. 2014;41:27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2013.10.002>

10. Gulfam S.M., Nawaz S.J., Ahmed A., Patwary M.N. Angle and time of arrival characteristics of 3D air-to-ground radio propagation environments. *Computer Communications*. 2017;112:22–37. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.08.011>

11. Larkovich MA, Doronichev AV. Digital control of technological processes of ground handling of aircraft. *Innovations of the young for scientific, technical and socio-economic development of the Russian Far East: materials of the 80th Interuniversity student scientific and practical conference*. Khabarovsk, 2022. (In Russ.) EDN: LKZGXP

12. Tabares DA, Mora-Camino F, Drouin A. A multitime scale management structure for airport ground handling automation. *Journal of Air Transport Manage-*

ment. 2021;90:101959. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101959>

13. Chen S-T, Ermiş G, Sharpanskykh A. Multi-agent planning and coordination for automated aircraft ground handling. *Robotics and Autonomous Systems*. 2023;167:104480. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104480>

14. Adler N, Brudner A, Gallotti R, Privitera F, Ramasco JJ. Does big data help answer big questions? The case of airport catchment areas & competition. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2022;166:444–467. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.10.013>

15. Andreatta G, De Giovanni L, Michele Monaci M. A Fast Heuristic for Airport Ground-Service Equipment-and-Staff Allocation. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2014;108:26–36. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.817>

16. Fitouri-Trabelsi S, Cosenza CAN, Mora-Cami F. Ground Handling Management at Airports with Fuzzy Information. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46:373–378. <https://doi.org/10.3182/2013.0911-3-BR-3021.00016>

17. Liu X, Wang Q, Zou C, Yu M, Liao D. Edge Intelligence For Smart Airport Runway: Architectures And Enabling Technologies. *Computer Communications*. 2022;195:323–333. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.09.003>

18. Ma J, Chen X, Xing Z, Zhang Y, Yu L. Improving the performance of airport shuttle through demand-

responsive service with dynamic fare strategy considering mixed demand. *Journal of Air Transport Management*. 2023;112:102459. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102459>

19. Kalakou S, Psaraki-Kalouptsidi V, Moura F. Future airport terminals: New technologies promise capacity gains. *Journal of Air Transport Management*. 2015;42:203–212. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.10.005>

20. Malik H, Tahir S, Tahir H, Ihtasham M, Khan F. A Homomorphic approach for security and privacy Preservation of smart airports. *Future Generation Computer Systems*. 2023;141:500–513. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.12.005>

21. Kovacicova K, Novak A, Kovacicova M, Sedlackova AN. Smart parking as a part of Smart airport concept. *Transportation Research Procedia*. 2022;65:70–77. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.11.009>

22. Rubio-Andrada L, Celemin-Pedroche MS, Escat-Cortes M-D, Jimenez-Crisostomo A. Passengers satisfaction with the technologies used in smart airports: An empirical study from a gender perspective. *Journal of Air Transport Management*. 2023;107:102347. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102347>

23. Ilchenko AV. Certificate of state registration of the computer program 2020662503 Russian Federation. CMSS data converter: 2020661140: App. 09.28.2020: publ. 10.14.2020. (In Russ.)

#### Сведения об авторах

**Ильченко Андрей Викторович**, ассистент, кафедра 307, факультет систем управления, информатики и электроэнергетики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация; ORCID: 0009-0004-0745-2285; E-mail: [ilchenkoav@mai.ru](mailto:ilchenkoav@mai.ru)

**Ильченко Татьяна Евгеньевна**, руководитель направления, ООО «АФЛТ-Системс», Москва, Российская Федерация; ORCID: 0009-0005-9440-5299; E-mail: [t.ilchenko@me.com](mailto:t.ilchenko@me.com)

#### About the authors

**Andrey V. Ilchenko**, assistant, chair 307, faculty of Control Systems, Informatics and power engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-0745-2285; E-mail: [ilchenkoav@mai.ru](mailto:ilchenkoav@mai.ru)

**Tatyana E. Ilchenko**, Head of Department, AFLT-Systems LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-9440-5299; E-mail: [t.ilchenko@me.com](mailto:t.ilchenko@me.com)



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-233-240

EDN: THTYTO

УДК 517.977

Научная статья / Research article

## Эффективное управление направлением тяги при скоростном маневре в плоскости

С.А. Решмин<sup>a</sup> , М.Т. Бектыбаева<sup>a,b</sup>  

<sup>a</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Российская Федерация

<sup>b</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ madi8991@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 12 апреля 2023 г.

Доработана: 21 июня 2023 г.

Принята к публикации: 28 июня 2023 г.

### Ключевые слова:

оптимальное управление, сила тяги, максимизация скорости, релейное управление

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Аннотация.** Исследуется управляемое движение инерционного объекта при скоростном маневре в вертикальной плоскости. Создаваемая тяга ограничена по величине, управлением является угол, задающий ее направление, начальная скорость в общем случае ненулевая, внешние силы не учитываются. Цель — максимизация горизонтальной проекции скорости в заданный конечный момент времени с одновременным выполнением двух терминальных условий: вывод объекта на заданную высоту и гашение вертикальной проекции скорости. Подобные задачи часто возникают при управлении механическими объектами с ограниченной по модулю тягой. Исследования актуальны, так как направлены на обеспечение как эффективности искомого алгоритма, так и простоты его расчета и реализации. При этом используются методы математической теории оптимального управления. В результате получено условие разрешимости поставленной задачи, связанное с минимально возможным временем движения в двойственной задаче быстродействия. В законе оптимального управления, основанного на так называемом законе дробно-линейного тангенса, найдена аналитическая зависимость между двумя константами интегрирования, что позволяет свесть процедуру определения этих констант к численному решению только одного трансцендентного уравнения. Также предложены способы построения двух релейных субоптимальных управлений, имеющих более простую структуру. Проведен соответствующий сравнительный анализ траекторий и сделаны выводы о том, что одна из предлагаемых субоптимальных стратегий более эффективна.

### Благодарности

Исследование выполнено в ИПМех РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00128).

### Для цитирования

Решмин С.А., Бектыбаева М.Т. Эффективное управление направлением тяги при скоростном маневре в плоскости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 233–240. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-233-240>

© Решмин С.А., Бектыбаева М.Т., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Efficient control of the direction of thrust during high-speed maneuver in the plane

Sergey A. Reshmin<sup>a</sup>, Madina T. Bektybaeva<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ [madi8991@mail.ru](mailto:madi8991@mail.ru)

### Article history

Received: April 12, 2023

Revised: June 21, 2023

Accepted: June 28, 2023

### Keywords:

optimal control, thrust force, velocity maximization, relay control

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Acknowledgements

The study was carried out at the IPMech RAS with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-11-00128).

### For citation

Reshmin SA, Bektybaeva MT. Efficient control of the direction of thrust during high-speed maneuver in the plane. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):233–240. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-233-240>

### Введение

В данной работе в качестве объекта управления рассматривается материальная точка постоянной массы в плоскости при выведении ее на прямолинейную траекторию (рис. 1), предметом исследования являются особенности управлениями такого рода объектами при использовании закона дробно-линейного тангенса, дополнительно приводятся релейные субоптимальные законы. В общем случае считается, что начальные скорости не равны нулю, то есть требуется выбрать управление таким образом, чтобы перевести объект на указанную выбранную прямую и по возможности максимизировать продольную скорость. Поэтому при решении целесообразно использовать принцип максимума [1; 2].

Ранее оптимальное решение аналогичной задачи в случае нулевой начальной скорости и пос-

**Abstract.** The controlled motion of an inertial object during a high-speed maneuver in a vertical plane is investigated. The generated thrust is limited in magnitude, the control is the angle that sets its direction, the initial velocity is generally non-zero, and external forces are not considered. The goal is to maximize the horizontal velocity projection at a given final moment of time with the simultaneous fulfillment of two terminal conditions: bringing the object to a given height and damping the vertical velocity projection. Similar tasks often arise when controlling mechanical objects with modulo-limited thrust. The research is relevant, as it is aimed at ensuring both the efficiency of the desired algorithm and the simplicity of its calculation and implementation. In this case, the methods of the mathematical theory of optimal control are used. As a result, a solvability condition for the problem posed is obtained, which is related to the minimum possible time of motion in the dual time-optimal control problem. In the law of optimal control, based on the so-called law of fractional linear tangent, an analytical relationship between two integration constants is found, which makes it possible to reduce the procedure for determining these constants to the numerical solution of only one transcendental equation. An appropriate comparative analysis of the trajectories was carried out and conclusions were drawn that one of the proposed sub-optimal strategies is more effective.

тоянной тяги было получено в [3; 4]. В [5] приведена задача с переменной реактивной тягой. Существует множество алгоритмов и законов, которые могут быть использованы для управления ракеты-носителя, максимизации скорости или минимизации топливных затрат, однако не все из них возможно реализовать [6]. Одним из часто используемых оптимальных законов управления является закон дробно-линейного тангенса (bilinear tangent steering law) [7]. Несмотря на то, что применение ограничивается моделью плоской Земли и плоского движения, его действительно можно использовать для задач наведения ракет [8, 9]. Так, в [10] подробно изложено практическое применение на примере управления системой Centaur-D1A. В явном виде уравнения были впервые показаны в [11; 12], а учет гравитационных эффектов разобран в [13]. Отметим, что существует

связь рассматриваемой задачи управления тягой с другими известными задачами оптимального управления механическими системами с одной степенью свободы [14]. Также закон дробно-линейного тангенса может появляться в некоторых других задачах механики [15].

Вместе с тем литература, посвященная рассмотрению закона дробно-линейного тангенса, обделена подробными теоретическими выкладками с точки зрения математических ограничений, например условия разрешимости для ненулевых начальных условий; кроме этого, в нашей работе в качестве замены оптимального законы были введены релейные управления, имеющие более простую структуру и не уступающие в эффективности на больших временах. При этом исследованы две возможные стратегии. В первом случае объект сначала переводился за минимальное время на заданную высоту с нулевой проекцией вертикальной скорости, а только потом разогнался вдоль горизонтали. Такое управление имеет максимум два переключения. Во втором случае допустимая величина вертикальной проекции тяги намеренно уменьшалась так, чтобы заданное время процесса управления совпало с минимально возможным временем, которое необходимо для выполнения двух рассматриваемых граничных условий. Соответствующее управление имеет максимум одно переключение, причем разгон вдоль горизонтали происходит на всех временных участках. Оно оказалось более эффективным.

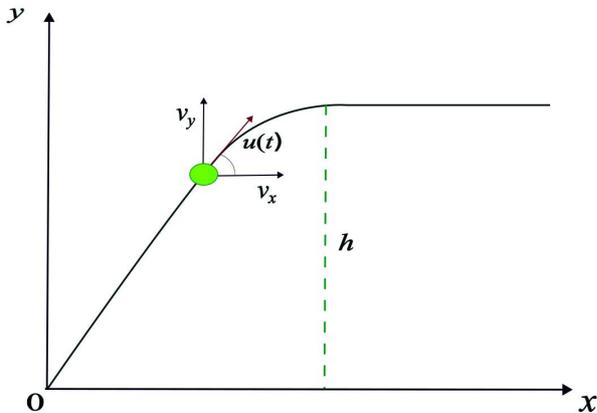


Рис. 1. Схема движения  
Figure 1. Movement scheme

### 1. Цель

Рассматривается система уравнений (1) совместно с граничными условиями (2), моделирование траектории движения проводилось путем чис-

ленного решения этой системы. Функционал, который характеризует качество управления и траектории, задан выражением (3).

$$\dot{x} = v_x, \quad \dot{y} = v_y,$$

$$\dot{v}_x = a \cos u(t),$$

$$\dot{v}_y = a \sin u(t), \tag{1}$$

$$x(0) = x_0 = 0, y(0) = y_0 = 0,$$

$$v_x(0) = v_{x0}, v_y(0) = v_{y0},$$

$$v_x(T) = h, \quad v_y(T) = 0, \tag{2}$$

$$J = v_x(T) \rightarrow \max, \tag{3}$$

где  $x, y$  — координаты,  $v_x, v_y$  — соответствующие проекции скорости,  $a$  — постоянное ускорение системы,  $u(t)$  — направление тяги (искомая кусочно-непрерывная функция времени),  $v_{x0}$  — начальная горизонтальная проекция скорости,  $v_{y0}$  — начальная вертикальная проекция скорости,  $h$  — требуемая высота подъема,  $v_x(T)$  — значение функционала в конечный момент времени  $T$ . Тяга велика, поэтому влиянием силы тяжести на динамику пренебрегли.

Задача состоит в управлении направлением тяги  $u(t)$  таким образом, чтобы перевести объект на траекторию, параллельную оси  $Ox$  и отстоящую от нее на расстояние  $h$ , и по возможности максимизировать продольную скорость  $v_x(T)$ .

### 2. Материалы и методы исследования

Использовались методы исследования: теоретическая часть включает анализ литературных источников; эмпирическая — создание программного кода на языке Python для нахождения параметров управления и численного решения системы дифференциальных уравнений с использованием встроенных математических и научных библиотек.

### 3. Результаты

В (1), (2) перейдем к безразмерным переменным:

$$x = hx', \quad y = hy', \quad v_x = \sqrt{hav'_x},$$

$$v_y = \sqrt{hav'_y}, \quad t = t'\sqrt{h/a}, \quad T = T'\sqrt{h/a}.$$

Если в полученной системе опустить штрих, то она совпадет с (1), (2), но будут выполнены дополнительные равенства  $h = 1, a = 1$ . Поэтому далее считаем существенными только два параметра:  $v_{y0}, T$ .

В ходе решения соотношений принципа максимума установлена связь между константами интегрирования в законе оптимального управления № 1 (т.е. в так называемом законе дробно-линейного тангенса [3; 4]):

$$u(t) = \arctg(-Ct + \operatorname{tg} u_0),$$

$$C = \frac{2a(aT \sin u_0 + v_{y0})}{\cos u_0 (a^2 T^2 - v_{y0}^2)} \quad (u(0) = u_0).$$

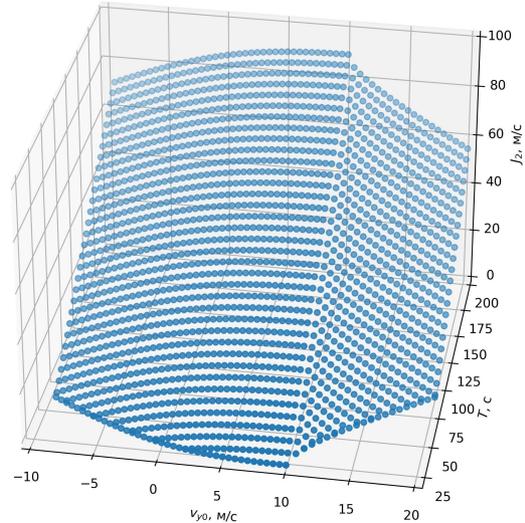
Показано, что определение параметра  $u_0$  сводится к численному решению всего лишь одного трансцендентного уравнения, как и в случае начальной нулевой скорости [3; 4]. Получено условие разрешимости задачи в виде неравенства  $T \geq T_{\min}(h, v_{y0}, a)$ , где  $T_{\min}$  — минимальное время, необходимое для выполнения граничных условий. Так как в предельном случае, когда  $T = T_{\min}$ , тяга направлена вдоль вертикали, то выражение для функции  $T_{\min}$  определяется так же (см. (4)), как и выражение для функции Беллмана в задаче быстрогодействия для одномерного объекта, движущегося вдоль прямой и приводимого в начало координат фазовой плоскости при помощи ограниченного по модулю управления [2]. Для определения минимального времени вводится вспомогательная функция  $\psi(y, v_y) = y - h + v_y \cdot \frac{|v_y|}{2a}$ , при этом  $\psi(y, v_y) = 0$  задает кривую переключений.

$$T_{\min} = \begin{cases} \frac{v_{y0}}{a} + \frac{2\sqrt{a(y_0-h) + \frac{v_{y0}^2}{2}}}{a} & \text{при } \psi(y_0, v_{y0}) \geq 0, \\ -\frac{v_{y0}}{a} + \frac{2\sqrt{-a(y_0-h) + \frac{v_{y0}^2}{2}}}{a} & \text{при } \psi(y_0, v_{y0}) < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Субоптимальное управление № 2 релейное (максимум с двумя переключениями) и представляет собой синтез двух управлений: сначала за время  $T_{\min}$  система наискорейшим образом переводится в требуемое состояние  $y(T_{\min}) = h, v_y(T_{\min}) = 0$  ( $u(t) = \pm\pi/2, t \in [0, T_{\min}]$ ), причем на этом этапе может быть максимум одно переключение, а потом, после дополнительного переключения в нуль,

обеспечивается равноускоренный разгон вдоль горизонтальной оси ( $u(t) = 0, t \in [T_{\min}, T]$ ).

Результаты численных расчетов представлены на рис. 2 в виде графика зависимости функционала  $J_2$  от начальной вертикальной проекции скорости и времени движения. При этом начальная горизонтальная проекция скорости предполагалась нулевой; синяя линия — граница области допустимых значений аргументов, которая определяется равенствами  $T = T_{\min}, J_2 = 0$ .



**Рис. 2.** Зависимость  $J_2$  от параметров  $v_{y0}, T$  при субоптимальном управлении № 2:  $a = 0,5 \text{ м/с}^2, h = 100 \text{ м}, T = 200 \text{ с}$

**Figure 2.** Dependence  $J_2$  on parameters  $v_{y0}, T$  under suboptimal control № 2:  $a = 0.5 \text{ m/s}^2, h = 100 \text{ m}, T = 200 \text{ s}$

Рассмотрим субоптимальное управление № 3 релейное (максимум с одним переключением). Структуру зададим в следующем виде, предварительно введя обозначение  $X = a \sin u_1$  и функцию переключения

$$\psi_1(X, y, v_y) = X(y - h) + \frac{v_y |v_y|}{2},$$

$$u(t) = \begin{cases} -u_1, & 0 \leq t \leq \tau, \\ u_1, & \tau < t \leq T, \end{cases}$$

при  $\psi_1(X, y_0, v_{y0}) \geq 0$ ,

$$\tau = \frac{XT + v_{y0}}{2X}, T = \frac{v_{y0}}{X} + \frac{2\sqrt{X(y_0-h) + \frac{v_{y0}^2}{2}}}{X}; \quad (5)$$

$$u(t) = \begin{cases} u_1, & 0 \leq t \leq \tau, \\ -u_1, & \tau < t \leq T, \end{cases}$$

при  $\psi_1(X, y_0, v_{y0}) < 0$ ,

$$\tau = \frac{X T - v_{y0}}{2X}, \quad T = -\frac{v_{y0}}{X} + \frac{2\sqrt{-X(y_0 - h) + \frac{v_{y0}^2}{2}}}{X}. \quad (6)$$

Субоптимальное управление № 3 позволяет ограничить проекцию тяги на вертикальную ось и обеспечить равноускоренный разгон вдоль горизонтальной оси в течение всего процесса. Приведем лемму без доказательств.

Лемма 1. Пусть  $X$  — параметр субоптимального закона управления (5), (6), соответствующий заданному времени процесса  $T$ . Тогда функция  $T(X)$  монотонно убывает, а следовательно

$$0 < X \leq a \quad T \geq T_{\min}. \quad (7)$$

Также приведем теорему для правильного выбора последовательности знаков управления и процедуру определения значений параметра  $X$  для трех разных диапазонов начальных скоростей:

Теорема 1. В случае малых положительных начальных скоростей существует пороговая длительность процесса

$$T_* = -\frac{2(y_0 - h)}{v_{y0}}, \quad (8)$$

разбивающая полубесконечный интервал допустимых значений  $T \geq T_{\min}$  на две части с разными вариантами переключения управления (5), (6):

$$u(0) = \begin{cases} -u_1, & \text{если } T \geq T_*, \\ u_1, & \text{если } T < T_*, \end{cases}$$

при  $0 < v_{y0} < \sqrt{-2a(y_0 - h)}. \quad (9)$

В случае больших положительных начальных скоростей существует только один вариант переключения:

$$u(0) = -u_1 \quad \text{при} \quad v_{y0} \geq \sqrt{-2a(y_0 - h)}. \quad (10)$$

В случае неположительных начальных скоростей также существует только один вариант переключения:

$$u(0) = u_1 \quad \text{при} \quad v_{y0} \leq 0. \quad (11)$$

Формулы (16) и (20) позволяют найти параметр  $X$  в случаях, когда должно быть  $u(0) = -u_1$  и  $u(0) = u_1$  соответственно.

Доказательство. Предположим, что

$$\psi_1(X, y_0, v_{y0}) \geq 0. \quad (12)$$

(В области неположительных начальных скоростей (11) предположение (12) не выполнено в силу ограничения (7)). Тогда из (5) следует равенство

$$X T - v_{y0} = 2\sqrt{X(y_0 - h) + \frac{v_{y0}^2}{2}}. \quad (13)$$

Левая его часть неотрицательна, если

$$X \geq \frac{v_{y0}}{T} \quad (v_{y0} > 0). \quad (14)$$

Возведем в квадрат обе части равенства (13) и получим квадратное относительно  $X$  уравнение:

$$X^2 T^2 - 2X[T v_{y0} + 2(y_0 - h)] - v_{y0}^2 = 0. \quad (15)$$

По теореме Виета корни уравнения (15) имеют разные знаки. Положительный корень находится по формуле

$$X = \frac{T v_{y0} + 2(y_0 - h) + \sqrt{[T v_{y0} + 2(y_0 - h)]^2 + T^2 v_{y0}^2}}{T^2}. \quad (16)$$

Из (14), (16) следует ограничение  $T \geq T_*$ , которое, в отличие от (14), уже не зависит от  $X$  (см. (8)) и гарантирует выполнение предположения (12). Его следует учитывать в области малых положительных начальных скоростей (9). В области больших положительных начальных скоростей (10) неравенство (14) выполнено при всех допустимых  $T$ , так как

$$T_* \leq T_{\min}, \quad (v_{y0} \geq \sqrt{-2a(y_0 - h)}).$$

Предположим теперь, что

$$\psi_1(X, y_0, v_{y0}) < 0. \quad (17)$$

(В области больших положительных начальных скоростей (10) предположение (17) не выполнено в силу ограничения (7).) Тогда из (6) следует равенство

$$XT + v_{y0} = 2\sqrt{-X(y_0 - h) + \frac{v_{y0}^2}{2}}. \quad (18)$$

При  $v_{y0} > 0$  положительность его левой части обеспечивается. Возведем в квадрат обе части (18) и получим квадратное относительно  $X$  уравнение:

$$X^2T^2 + 2X[Tv_{y0} + 2(y_0 - h)] - v_{y0}^2 = 0. \quad (19)$$

По теореме Виета корни уравнения (19) имеют разные знаки. Положительный корень находится по формуле

$$X = \frac{-[Tv_{y0} + 2(y_0 - h)] + \sqrt{[Tv_{y0} + 2(y_0 - h)]^2 + T^2v_{y0}^2}}{T^2}. \quad (20)$$

Это решение должно удовлетворять дополнительному условию

$$X < \frac{v_{y0}}{T} \quad (v_{y0} > 0), \quad (21)$$

которое следует из (17). Из (20), (21) вытекает неравенство  $T < T_*$ , которое, в отличие от (21), уже не зависит от  $X$  (см. (8)). Его следует учитывать в области малых положительных начальных скоростей (9). В области неположительных начальных скоростей (11) согласно (20) при всех допустимых  $T$  выполнено неравенство

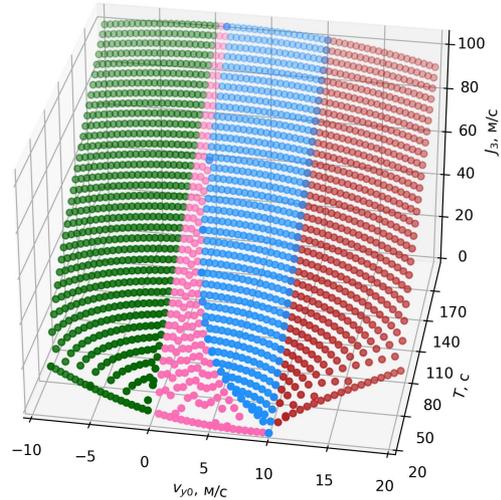
$$X \geq -\frac{v_{y0}}{T} \quad (v_{y0} \leq 0), \quad (22)$$

которое гарантирует, что левая часть (18) положительна, а также, что предположение (17) выполнено.

Наконец, существование порогового значения  $T_*$  в области малых положительных начальных скоростей (9) вытекает из соотношения

$$T_* > T_{\min} \quad (0 < v_{y0} < \sqrt{-2a(y_0 - h)}).$$

Результаты численных расчетов представлены на рис. 3 в виде графика зависимости функционала  $J_3$  от начальной вертикальной проекции скорости и времени движения. Зеленая область описывается уравнением (11), красная область — уравнением (10), случай малых положительных скоростей состоит из розовой области ( $T_{\min} \leq T \leq T_*$ ) и голубой области ( $T > T_*$ ), к ним применяется (9).



**Рис. 3.** Зависимость  $J_3$  от параметров  $v_{y0}, T$  при субоптимальном управлении № 3:  $a = 0,5 \text{ м/с}^2, h = 100 \text{ м}, T = 200 \text{ с}$

**Figure 3.** Dependence  $J_3$  on parameters  $v_{y0}, T$  under suboptimal control № 3:  $a = 0.5 \text{ m/s}^2, h = 100 \text{ m}, T = 200 \text{ s}$

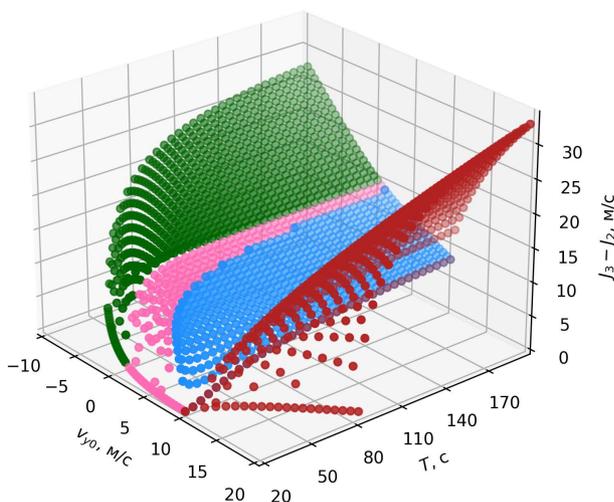
#### 4. Обсуждение

В данной работе мы исследовали оптимальное и субоптимальное управление тягой инерционного объекта при последующем выведении на прямолинейный участок. В отличие от работ [3; 4], где получены аналитические выражения для случая нулевой начальной скорости при оптимальном управлении с дробно-линейным тангенсом, результаты расширены на случай начальной ненулевой скорости. Показано, что процедура определения констант интегрирования сводится к численному решению только одного трансцендентного уравнения. Аналогично [2] получено выражение для  $T_{\min}$ . Также представлены субоптимальные управления, которые обеспечивают практически тот же функционал при многократном увеличении времени движения, при этом управление № 3 имеет дополнительное пороговое значение в виде  $T_*$ , которое пропадает при рассмотрении больших скоростей.

Результаты имеют важное значение для проектирования и оптимизации систем с ограниченной тягой, закон дробно-линейного тангенса может быть реализован без необходимости сложных численных вычислений или заменен субоптимальным. Тем не менее исследование имеет ограничение в виде отсутствия внешних сил в уравнениях движения, которые будут учтены в дальнейших работах.

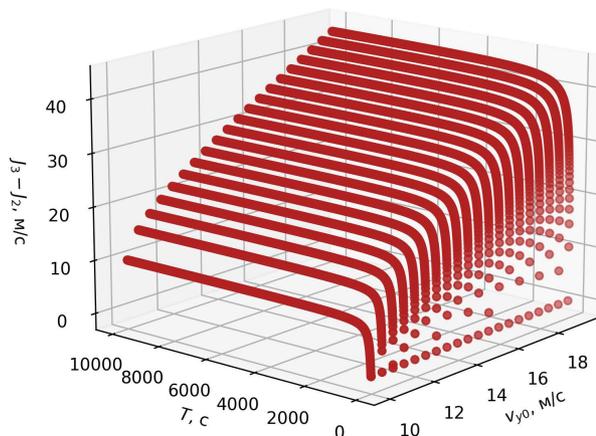
## Заключение

Исследовано движение инерционного объекта при оптимальном скоростном маневре в вертикальной плоскости, при этом предложены дополнительные субоптимальные управления. В уравнениях проварьированы основные параметры (скорость  $v_{y0}$ , время движения  $T \geq T_{\min}$ ), исследовано допустимое время движения, зависящее от начальных условий, найдены значения горизонтальной проекции скорости в конце процесса. Аналогичные результаты могут быть получены в безразмерных величинах, предложенных выше.



**Рис. 4.** Зависимость  $J_3 - J_2$  от параметров  $v_{y0}, T$ :  
 $a = 0,5 \text{ м/с}^2$ ,  $h = 100 \text{ м}$ ,  $T = 200 \text{ с}$   
**Figure 4.** Dependence  $J_3 - J_2$  on parameters  $v_{y0}, T$ :  
 $a = 0.5 \text{ м/с}^2$ ,  $h = 100 \text{ м}$ ,  $T = 200 \text{ с}$

В результате сопоставления двух субоптимальных управлений было выяснено, что второе имеет более сложную структуру, зависящую от выбора отрезка времени движения и начальной скорости  $v_{y0}$ . При всех равных условиях оно более эффективно (рис. 4) и является обобщением управления, указанного в [3]. Отличие состоит в исследовании движения при ненулевой начальной скорости. При рассмотрении разности функционалов оказалось, что при больших временах предел стремится к конечному значению (рис. 5). Аналогично при сравнении оптимального и субоптимальных управлений предел отношений стремится к конечному значению, единице. В дальнейшем планируется учет внешних сил.



**Рис. 5.** Зависимость  $J_3 - J_2$  от параметров  $v_{y0}, T$ :  
 $a = 0,5 \text{ м/с}^2$ ,  $h = 100 \text{ м}$ ,  $T = 10\,000 \text{ с}$   
**Figure 5.** Dependence  $J_3 - J_2$  on parameters  $v_{y0}, T$ :  
 $a = 0.5 \text{ м/с}^2$ ,  $h = 100 \text{ м}$ ,  $T = 10\,000 \text{ с}$

## Список литературы

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 392 с.
2. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. М.: Наука, 1971. 396 с.
3. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с.
4. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высшая школа, 2003. 614 с.
5. Исаев В.К. Принцип максимума Л.С. Понтрягина и оптимальное программирование тяги ракет // Автомат. и телемех. 1961. Т. 22. Вып. 8. С. 986–1001.
6. Rose M.B., Geller D. Linear covariance techniques for powered ascent // AIAA guidance, navigation, and control conference. 2–5 August, Toronto, Ontario, Canada. 2010. Article 8175. <https://doi.org/10.2514/6.2010-8175>
7. Markl A.W. An initial guess generator for launch and reentry vehicle trajectory optimization. PhD thesis, Institut für Flugmechanik und Flugregelung der Universität Stuttgart, Germany, 2001. <http://doi.org/10.18419/opus-3655>
8. Boelitz F.W. Guidance, steering, load relief and control of an asymmetric launch vehicle. Report № NAS 1.26:185598. 1989.
9. Bruschi R. Bilinear tangent yaw guidance // Guidance and Control Conference. 06 August, Boulder, CO, U.S.A. 1979. <https://doi.org/10.2514/6.1979-1730>
10. Gordan A.L. Centaur D-1A guidance/software system // Ann. Rocky Mountain Guidance and Control Conf. Report № NASA-TM-83552. Keystone, Colorado, 1983.

11. Perkins F.M. Derivation of lineartangent steering laws // Aerospace Corporation, El Segundo, California, R-1001 (99990)-1, Nov. 1966. <https://doi.org/10.21236/ad0643209>

12. Riatti P. Optimal control and near-optimal guidance for the ascent of ARIANE 5. Master's Thesis, IFR. University of Stuttgart, 1997.

13. Townsend G.E., Abbott A.S., Palmer R.R. Guidance, flight mechanics and trajectory optimization // National Aeronautics and Space Administration. 1968. Vol. 8. Boost Guidance Equations. P. 7–23.

14. Бектыбаева М.Т., Решмин С.А. Методика решения задач оптимального управления механическими системами при ограничении на модуль управляющей силы // Modern European Researches. 2023. Т. 1. № 1. С. 38–44.

15. Розенблат Г.М. Механика в задачах и решениях. М.: Едиториал УРСС, 2004. 160 с.

## References

1. Pontryagin L.S, Boltyansky V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. Mathematical theory of optimal processes. New York: Gordon and Breach; 1986.

2. Roitenberg Ya.N. *Automatic control*. Moscow: Nauka Publ.; 1971:396. (In Russ.)

3. Bryson A.E., Ho Y.-C. *Applied optimal control: optimization, estimation, and control*. Waltham, Mass.: Blaisdell Pub. Co; 1969.

4. Afanasyev V.N., Kolmanovsky V.B., Nosov V.R. *Mathematical theory of control system design*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2003. (In Russ.)

5. Isaev V.K. L.S. Pontryagin's maximum principle and optimal programming of rocket thrust. *Automation and Remote Control*. 1961;22(8):881–893. (In Russ.)

6. Rose M.B., Geller D. Linear covariance techniques for powered ascent. *AIAA guidance, navigation, and control conference*. 2–5 August, Toronto, Ontario, Canada. 2010:8175. <https://doi.org/10.2514/6.2010-8175>

7. Markl A.W. An initial guess generator for launch and reentry vehicle trajectory optimization. PhD thesis, Institut für Flugmechanik und Flugregelung der Universität Stuttgart, Germany; 2001. <http://doi.org/10.18419/opus-3655>

8. Boelitz F.W. Guidance, steering, load relief and control of an asymmetric launch vehicle. *Report №. NAS 1.26:185598*;1989.

9. Brusck R. Bilinear tangent yaw guidance. *Guidance and Control Conference*. 06 August, Boulder, CO, U.S.A. 1979. <https://doi.org/10.2514/6.1979-1730>

10. Gordan A.L. Centaur D-1A guidance/software system. Ann. Rocky Mountain Guidance and Control Conf. Report № NASA-TM-83552. Keystone, Colorado; 1983.

11. Perkins F.M. Derivation of linear-tangent steering laws. *Aerospace Corporation, El Segundo, California*; TR-1001 (99990)-1, Nov. 1966. <https://doi.org/10.21236/ad0643209>

12. Riatti P. *Optimal control and near-optimal guidance for the ascent of ARIANE 5*. Master's Thesis, IFR. University of Stuttgart; 1997.

13. Townsend G.E., Abbott A.S., Palmer R.R. Guidance, flight mechanics and trajectory optimization. *National Aeronautics and Space Administration. Boost Guidance Equations*. 1968;7–23.

14. Bektybaeva M.T., Reshmin S.A. Methods for solving problems of optimal control of mechanical systems with a restriction on the modulus of the control force. *Modern European Researches*. 2023;1(1):38–44. (In Russ.)

15. Rosenblat G.M. *Mechanics in problems and solutions*. Moscow: Editorial URSS; 2004.

## Сведения об авторах

**Решмин Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, гл. научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4817-159X; E-mail: reshmin@ipmnet.ru

**Бектыбаева Мадина Тимуровна**, инженер лаборатории механики систем, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Российская Федерация; аспирант департамента механики и процессов управления, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-8875-4610; E-mail: madi8991@mail.ru

## About the authors

**Sergey A. Reshmin**, Dr. Phys.-Math. Sci., Corresponding Member of RAS, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4817-159X; E-mail: reshmin@ipmnet.ru

**Madina T. Bektybaeva**, Engineer, Laboratory of Mechanics of Systems, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; PhD student of the Department of Mechanics and Control Processes, RUDN University, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8875-4610; E-mail: madi8991@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-241-261  
EDN: TIZGFN  
УДК 658.5:006.015.5

Научная статья / Research article

## Автоматизация выбора подрядчиков с применением искусственных нейронных сетей для повышения качества и технологической безопасности

А.С. Миллер

Балтик Винд Групп, Гамбург, Германия  
✉ a.miller@baltic-wind.de

### История статьи

Поступила в редакцию: 26 апреля 2023 г.  
Доработана: 3 июля 2023 г.  
Принята к публикации: 15 июля 2023 г.

### Ключевые слова:

управление качеством, геометрическое распознавание конструкции изделий, семантический анализ, конструктивно-технологическая сложность, машинное обучение, мультиагентные системы, нейросети

### Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Для цитирования

Миллер А.С. Автоматизация выбора подрядчиков с применением искусственных нейронных сетей для повышения качества и технологической безопасности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 241–261. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-241-261>

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы оценки трудоемкости, определения технологической возможности изготовления изделий, обеспечения качества, оптимизации технологических процессов, формирования базы знаний, машинного обучения и автоматической обработки входящих запросов на предприятиях машиностроительной отрасли. Поднимается проблема обеспечения качества при выполнении государственного заказа, предлагаются решения для исключения возможности субъективных оценок и директивного ценообразования при заключении контрактов во избежание принятия заведомо невыполнимых обязательств. Представлены устоявшиеся практики обработки входящих запросов на машиностроительных предприятиях, выявляются проблемы, анализируется их влияние на технологическую безопасность машиностроительной отрасли. Проведен обзор актуальных российских и зарубежных исследований по теме и предлагаемых решений в области применения инструментов семантического анализа, мультиагентных систем и искусственных нейросетей в работе машиностроительных предприятий.



## Automation of contractors' selection applying artificial neural networks to increase quality and technological security

Andrej S. Miller 

Baltic Wind Group, *Hamburg, Germany*

✉ a.miller@baltic-wind.de

### Article history

Received: April 26, 2023

Revised: July 03, 2023

Accepted: July 15, 2023

### Keywords:

quality management, geometric and optical character recognition of parts, semantic analysis, machine learning, constructive-technological complexity, multi-agent systems, neural networks

### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interests.

### For citation

Miller AS. Automation of contractors' selection applying artificial neural networks to increase quality and technological security. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):241–261. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-241-261>

**Abstract.** The research considers problems of labour-intensiveness estimation, determination of technological feasibility of manufacturing, quality assurance, optimisation of technological processes, formation of knowledge base, machine learning and automatic processing of incoming enquiries at machine-building enterprises. The research raises the problem of quality assurance when performing a state order and offers solutions to eliminate the possibility of subjective estimates and directive pricing at contracting, in order to avoid making knowingly unrealizable commitments. The author considers established practice of processing incoming orders at machine-building enterprises, identifies problems, analyses their impact on the technological safety of the machine-building industry. A review of current Russian and foreign research on the topic and proposed solutions in the application of semantic analysis tools, multi-agent systems and artificial neural networks in the work of machine-building enterprises is given.

## Введение

Современная экономика с каждым годом сталкивается с вызовами, не позволяющими предприятиям продолжать работать по методикам, сложившимся в ходе XX в. и воспринимавшимся долгое время в профессиональной среде как константа. Политические кризисы, эмбарго, нарушение стабильности поставок энергоносителей и попытки перехода на новые виды энергии в ряде стран погружают мировую экономику в перманентную лихорадку, которая вряд ли когда-то сменится долгосрочной стабильностью и предсказуемостью [1].

Отраслевые стандарты и правовая база, регулирующие машиностроительную отрасль, сформировались преимущественно в 60-е гг. XX в. в рамках четвертого технологического уклада. Этот технологический уклад базировался на энергии углеводородов, тогда же началось развитие атомной энергетики, и основными отраслями промышленности были автомобилестроение, цветная металлургия, нефтехимия и другие отрасли, для которых характерным было массо-

вое, поточное и крупносерийное производство. Горизонты планирования были длинными, поставки энергоносителей — стабильными, торговые отношения — долгосрочными, а производственные планы — стабильными. Постоянное участие человека в производственном процессе, а также в экономическом планировании и управлении производством было необходимым, трудовые отношения строились на базе 40-часовой рабочей недели и постоянного присутствия сотрудников на рабочих местах. Развитие современных технологий конструирования, проектирования, планирования и самого производства требует кардинального переосмысления подхода к промышленной кооперации и выстраиванию отношений «заказчик–исполнитель». Внешнеполитические угрозы, технологическое соперничество и взаимные торговые барьеры уже не позволяют государствам и корпорациям играть по правилам свободного рынка, а вынуждают искать новые механизмы обеспечения собственного технологического суверенитета, обеспечения технологической безопасности и бесперебойной работы критически важных отраслей [2].

Специфика работы предприятий энергетического, общего и специального машиностроения предполагает выполнение технологически сложных, часто единичных или мелкосерийных заказов, которые редко повторяются. Весь технологический процесс выстраивается под конкретный заказ для обеспечения конструкционных и технологических требований заказчика. Ядро компетенций таких предприятий часто составляет уникальное технологическое оборудование, позволяющее работать с особо крупными заготовками, обеспечивать особую точность механической обработки или производить детали со сложной геометрией, например турбинные лопатки. При этом технологическая оснастка создается под каждый конкретный заказ и часто уничтожается после его выполнения, если заказ был единичным и его повторение не планируется.

В текущих рыночных условиях такие машиностроительные предприятия часто не обеспечены стабильными заказами и вынуждены долгое время простаивать в поиске новых контрактов. Перерывы между крупными заказами могут достигать нескольких лет, в течение которых кадровый состав предприятий может меняться. Все это приводит к необходимости заново выстраивать производственные процессы и систему управления качеством продукции при получении нового заказа. Кроме того, еще в ходе обработки входящих запросов и подготовки технико-коммерческих предложений часто не представляется возможным опереться на накопленный опыт предприятия из-за смены инженерных кадров и отсутствия постоянно пополняемой базы знаний с возможностью быстро найти подходящий прецедент из истории прошлых заказов. В итоге технико-коммерческие предложения готовятся на основе нередко устаревших нормативов и справочников, а также субъективных оценок профильных служб предприятия — от технических до экономических. В условиях жесткой конкуренции и часто борьбы предприятий за выживаемость решения о ценообразовании и контрактации часто принимаются руководителями предприятий с высокой долей субъективных оценок и носят волюнтаристский характер. Проблему таких технологически необоснованных волевых решений и директивного ценообразования подробно рассматривали

исследователи в области хозяйственного права и управления предприятием<sup>1</sup>. Следствием таких решений нередко становится взятие на себя задомо невыполнимых обязательств по срокам, цене и качеству продукции. Если на этапе заключения контракта заказчик не провел углубленного аудита качества поставщика и не потребовал приведения его производственной системы в соответствие со своими требованиями, в том числе в области качества, то нередко возникает риск либо полного срыва заказа, либо его существенной задержки с привлечением субподрядчиков и согласованием карты отклонений при итоговой приемке. Для машиностроительной отрасли часто это означает срыв сроков ввода в эксплуатацию критически важных для государства объектов, таких как электростанции, ледоколы и военные корабли, что ставит под угрозу технологический суверенитет, энергетическую безопасность и общую обороноспособность страны [4; 5].

Другой фактор риска, связанный с устоявшейся практикой обработки заказов и пренебрежением созданием базы знаний предприятий, связан с выживаемостью самих предприятий в условиях повышения прозрачности процессов закупок и роста технических и финансовых требований к поставщикам. Машиностроительные предприятия, не имевшие крупных заказов в течение нескольких лет, часто не соответствуют требованиям для участия в тендерах как по опыту, так и по финансовой состоятельности. Парк оборудования при этом может быть уникальным, а само предприятие представлять критическую важность для отрасли, но из-за длительного отсутствия заказов и острой конкуренции с крупными корпорациями и иностранными поставщиками нередко такой простой заканчивается банкротством. За последние 20 лет только в Санкт-Петербурге прекратили свое существование несколько сотен заводов, среди которых предприятия с уникальными машиностроительными компетенциями такие, как АО «Сестрорецкий инструментальный завод», ОАО «Петербургский трамвайно-механический завод», ЗАО «Вагонмаш» и ряд производств в рамках Кировского завода. Нередко из-за расположения производственных корпусов таких предприятий на дорожных земельных участках их банкротство пред-

<sup>1</sup> Рустамова И.Т. Обоснование контрактных цен: учебно-методическое пособие. М.: Юридический институт, МИИТ, 2012. 211 с.

ставляет интерес и для их собственников — частных лиц, которым эти предприятия достались по итогам залоговых аукционов и приватизации первой половины 1990-х гг. В результате отрасль лишается машиностроительных мощностей и уникального оборудования, что также ставит под угрозу технологический суверенитет и нередко приводит к зависимости от импорта.

Таким образом, российская машиностроительная отрасль ввиду устоявшейся практики работы с заказами и вследствие роста нестабильности внешней среды сталкивается с рядом проблем:

1. Длительные сроки обработки заказов и низкая точность оценок трудоемкости, технологических возможностей и стоимости.

2. Срывы сроков, неисполнение технологических требований заказчика, непредсказуемый рост стоимости, неудовлетворительное качество готовой продукции и угрозы срыва ввода в эксплуатацию критически важных машиностроительных изделий.

3. Длительный простой уникальных машиностроительных мощностей с последующим банкротством и ликвидацией предприятий, имеющих большой потенциал для отрасли.

**Постановка целей и задач.** *Цель исследования* — разработка концептуального решения вышеупомянутых проблем. Разрабатываемое решение позволит построить устойчивую отраслевую систему взаимодействия заказчиков и исполнителей, которая обеспечит возможность быстро и без субъективных оценок определять принципиальную возможность изготовления запрашиваемых изделий, выявлять оптимальные технологические маршруты и оценивать примерную стоимость исполнения контракта с минимальной погрешностью.

Для достижения этой цели необходимо решить ряд задач: изучить и проанализировать устоявшиеся практики обработки заказов в машиностроении, сформировать перечень процессов, требующих формализации и автоматизации, разработать и создать программный инструмент, позволяющей быстро и точно обрабатывать заказы, обеспечивать требуемый уровень качества, накапливать знания и бесконечно обучаться [6].

Для достижения цели исследования применялись теоретические методы в виде анализа литературы и применяемых подходов, выявление и постановка проблем. Также с учетом практического опыта автора в машиностроительной отрасли

применялись эмпирические методы в виде наблюдения за работой производственных систем предприятий российского и зарубежного машиностроения, анализа их сильных и слабых сторон, разработки экспериментального программного средства и описания логики работы предлагаемого программного средства для решения обозначенных проблем.

## 1. Обзор устоявшейся практики обработки запросов в машиностроении

В устоявшейся на сегодняшний день практике обработки заказов на машиностроительных предприятиях решение о принципиальной возможности изготовления запрашиваемого продукта зависит как минимум от инженеров-конструкторов и инженеров-технологов, специалистов по планированию производства и специалистов по снабжению.

С точки зрения инженера, заказ может быть исполнен при соблюдении следующих условий:

1. Состав технологического оборудования и его техническое состояние соответствуют требованиям конструкторской документации (КД).

2. Имеющийся персонал в состоянии выполнить работу в соответствии с требованиями КД.

3. Имеющиеся в распоряжении предприятия средства контроля качества позволяют произвести проверку продукции в целом и по отдельным ее элементам на предмет соответствия КД и в соответствии с условиями приемки заказчика продукции.

С точки зрения специалиста по планированию, заказ может быть выполнен в установленные сроки при соблюдении следующих условий:

1. Наличие достоверной маршрутной технологии.

2. Наличие ресурса оборудования в соответствующие периоды времени.

3. Наличие ресурса персонала в соответствующие периоды времени.

С точки зрения специалиста по снабжению, необходимы:

1. Физическая и коммерческая возможность поставки материала.

2. Возможность поставки всех требуемых материалов и услуг субподрядчиков в заданный период времени.

В конечном итоге речь идет о разработке следующих документов:

1. Технологический процесс с соответствующими материальными спецификациями (основной заказ + подготовка производства)

2. График использования производственных мощностей по видам и категориям оборудования на период исполнения заказа.

3. График материально-технического обеспечения заказа.

В устоявшейся практике обработки заказов в машиностроении подготовка этих документов в полном объеме и с надлежащим качеством в период согласования заказа и принятия решения о контрактации, как правило, не производится, поскольку требует времени и материальных затрат, которые еще нельзя отнести на счет конкретного проекта.

В ходе работы над заказом на большинстве предприятий принято руководствоваться не документами, а оценками профильных служб, т.е. набором субъективных мнений. Документы рождаются в случае заключения договора и фактического начала работ. По мере появления этих документов выявляется разница между принятыми на себя обязательствами и реально располагаемыми возможностями — невозможно обработать изделие с требуемой точностью, отсутствуют необходимые средства измерения и контроля, параметры имеющегося оборудования не соответствуют параметрам запрашиваемого изделия. В ходе производства к теоретическим несоответствиям возможностей предприятия требованиям заказчика добавляются казусы исполнителей. В итоге нередко даже при формально корректном исполнении условий договора, после приемки результатов, заказчик больше не заинтересован в продолжении сотрудничества с данным исполнителем и ищет альтернативного поставщика, исполнитель входит в период простоя, поиска новых заказов и борьбы за выживание<sup>2</sup>.

Для решения проблемы необходимо найти инструментарий разрешения нескольких пар противоречий:

1) сроки оценки заказа — трудоемкость и качество инженерных расчетов;

2) инженерные требования к изделию — фактические технологические возможности, в том числе возможности технического контроля;

3) сроки исполнения заказа — балансы загрузки необходимого оборудования во времени.

## 2. Семантический анализ деталей и сборочных единиц

Для разрешения этих противоречий целесообразно использовать разбивку конструкции изделия в соответствии с чертежом на конструкторско-технологические признаки на основе машиностроительных классификаторов. По результатам такой разбивки можно сделать укрупненную маршрутизацию технологического процесса без привязки к мощностям предприятия. Базовым результатом операции будет установленное соответствие между конструкторскими требованиями к исполнению деталей и сборочных единиц (ДСЕ) и конкретными единицами оборудования, позволяющими эти требования выполнить. Дополнительным результатом будут укрупненные технологические маршруты и перечень работ по каждой ДСЕ, выполняемым по кооперации.

Конструкторско-технологические требования ДСЕ, а также необходимые характеристики по качеству для решения вышеописанной задачи целесообразно приводить к формализованному виду. Для удобства проведения предлагаемой проверки соответствия параметров ДСЕ параметрам технологического оборудования требования первых и возможности последних должны быть выражены количественно и формализованы в строгой неменяющейся последовательности. Одним из видов такого представления могут быть так называемые кортежи данных — структурированные блоки информации, каждая часть которых отведена под конкретный аспект. Посредством совмещения таких кортежей данных по ДСЕ и по единицам оборудования можно быстро выявлять степени соответствия и делать заключения о принципиальном наличии или отсутствии технологической возможности изготовить требуемые ДСЕ с заданным уровнем качества. Такая технология перебора и совмещения информации, широко применяемая в программировании под названием «парсинг», является семантическим анализом и способна существенно ускорить задачу рассмотрения входящего запроса.

В рамках этого же формального алгоритма конструкторско-технологической оценки изделия реализуются и задачи управления качеством через задание степени соответствия технических требований и технических возможностей (стро-

<sup>2</sup> Вольф Е.В., Хвостов А.Б., Ивченко Б.П., Сизова А.А. Антикризисное управление: учебное пособие. СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2022. 102 с.

гое совпадение, требования превышают возможности, возможности перекрывают требования).

Укрупненный маршрут и состав привлекаемого оборудования позволяют определить с достаточно высокой точностью технологическое время на изготовление ДСЕ и производственную себестоимость продукции.

Полученные данные позволяют встроить изготовление рассматриваемых ДСЕ в технологические балансы производственных мощностей предприятия, а также укрупненно определить время и стоимость их изготовления. Данный подход позволяет миновать ряд трудоемких конструкторско-технологических предварительных работ при принятии решения по рассматриваемому заказу. При использовании такого подхода достигается ключевое конкурентное преимущество — оперативность принятия решения по заказу при минимальных затратах трудовых ресурсов в сравнении с устоявшимся подходом, когда этот процесс занимает несколько недель и часто не заканчивается подписанием контракта, что приводит к высоким и непродуктивным затратам работников предприятия [7].

Устоявшаяся практика обработки запросов в современном российском машиностроении строится на принципах технико-экономического планирования, широко распространенных еще в советский период. Различные службы предприятия, участвующие в процессе рассмотрения входящего запроса, оценки трудоемкости и принятия решения о взятии заказа в работу, часто ввиду внутренних конфликтов и других причин действуют разобщенно — эту проблему рассматривал журнал *Forbes*, теоретики управления производством и специалисты по управлению персоналом. Часто эта разобщенность выражается в том, что какие-то элементы процесса дублируются, срок рассмотрения запроса достигает нескольких месяцев, а заложенные с большим запасом риски ввиду неопределенности в расчетах ведут к заведомо неконкурентным ценам. Все это существенно снижает привлекательность предприятия

как партнера, сокращает количество принятых заказов по отношению к количеству входящих запросов, но, тем не менее, требует значительных ресурсов на содержание аппарата производственной системы<sup>3</sup> [8].

Чтобы избавиться от несогласованности в действиях производственных служб, минимизировать трудозатраты, существенно сократить время обработки входящих запросов и повысить достоверность технико-коммерческих оценок целесообразно рассматривать производственную систему как единый организм с признаками мультиагентной системы. Основные цели производственной системы предприятия — это максимизация загрузки мощностей, выполнение коммерческих обязательств, обеспечение требуемого уровня качества продукции и максимизация прибыли.

Производственная система включает в себя совокупность элементов, таких как технологическое оборудование, внутрипроизводственная транспортная инфраструктура, подъемно-транспортное оборудование, заготовки в исходном состоянии и в процессе изготовления, готовая продукция, производственные и складские площади и др. Они имеют параметры и характеризуются мотивированным поведением. Современные средства коммуникации и контроля позволяют этим элементам поддерживать связь между собой, передавать и интерпретировать данные о взаимных состояниях и сохранять автономность. Рассматриваемые элементы могут быть представлены в качестве агентов, преследующих свои цели, общающихся между собой и обеспечивающих при правильной организации системы синергетический эффект. Совокупность агентов, их связей и взаимного влияния, подчиняющегося ряду закономерностей, представляет собой мультиагентную систему. Появляется возможность быстрого перераспределения ролей агентов, что дает системе вариативность и обеспечивает большую стабильность за счет нахождения нескольких состояний равновесия системы<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> См.: *Коришнова Л.А., Кузьмина Н.Г.* Управление и организация производства: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 193 с.; Как преодолеть разобщенность между подразделениями? // *WRIKE*. URL: <https://www.wrike.com/ru/blog/kak-preodolet-razobshhennost-mezhdu-podrazdeleniyami/?ysclid=lfu2hu4yt292884141> (дата обращения: 10.03.2023).

<sup>4</sup> *Антохина Ю.А., Варжанетян А.Г., Семенова Е.Г., Смирнова М.С.* Экспертная оценка и управление инновационными проектами с учетом факторов неопределенности среды: учебное пособие. СПб.: Изд-во ГУАП, 2021. 242 с.

### 3. Мультиагентная природа производственной системы предприятия

Идея мультиагентных систем была предложена еще в середине XX в. советским математиком М.Л. Цетлиным, занимавшимся исследованием коллективного поведения автоматов. Уже тогда агентами были названы искусственные существа, способные воспринимать и интерпретировать сигналы, поступающие из внешней среды, а также формировать свои. Эти искусственные существа не имели априорных знаний об окружающей их среде и наличии других подобных существ, но имели цель своей деятельности и способность оценивать поступающие сигналы в контексте достижения этой цели. Набор откликов на изменения среды позволял говорить о наличии рациональности в поведении такого рода агентов и их способности к адаптации к изменениям внешней среды [9].

В современной практике мультиагентность успешно применяется в ракетных комплексах и системах групповой самоорганизации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В зависимости от условий среды, внешнего воздействия и изменений параметров задачи группы отдельные ракеты, БПЛА или другие беспилотные устройства моментально обмениваются информацией, адаптируются к изменениям, перегруппируются и при необходимости перераспределяют роли. Для построения таких децентрализованных самоорганизующихся интеллектуальных систем применяются роевые алгоритмы, построенные по принципу алгоритмов пчелиной колонии и социального поведения птиц и рыб в стае. К таким мультиагентным системам относятся самоорганизующиеся сети MANET (Mobile Ad Hoc Network), применяемые в телекоммуникации и управлении объектами критической инфраструктуры, VANET (Vehicular Ad Hoc Network), применяемые на транспорте и FANET (Flying Ad Hoc Network), используемые для управления группами БПЛА. Отличие применения подобных алгоритмов и сетей в мультиагентной системе машиностроительного предприятия состоит в масштабе и сложности задачи, а также в кратно более высоком количестве параметров [10; 11].

Технически реакция производственной системы предприятия на входящий запрос, распределение и перераспределение ролей, а также получение оценок технологических возможностей должно происходить мгновенно как с целью

минимизации времени обработки запросов, так и с целью повышения достоверности оценок на заданный период времени. Это обуславливает необходимость автоматизированной работы системы, что технически может быть решено с помощью различных аппаратных инструментов. К программным средствам, позволяющим работать с мультиагентными системами, относятся такие программные комплексы, как СПРУТ, MongoDB, JADE, ABLE, Repast, MASON.

Характер поведения элементов производственной системы, объединенных общими целями, позволяет считать их интеллектуальными агентами мультиагентной системы, которые обладают следующими свойствами:

- автономность (способность функционировать без внешнего вмешательства, контролировать свои действия и внутреннее состояние);
- активность;
- коммуникативность (взаимодействие с другими агентами);
- реактивность (способность адекватно реагировать на действия других агентов и изменения внешней среды);
- целенаправленность действий;
- наличие базовых знаний о себе и других агентах;
- убеждения (переменная часть базовых знаний, меняющихся во времени);
- желания (стремления к определенным состояниям);
- намерения (планируемые действия по достижению желаемых состояний);
- обязательства (выполнение задач, поставленных другими агентами).

В ряде случаев агенты системы должны быть готовы дублировать свои функции или дополнять функции друг друга ради достижения общих целей системы, являющихся приоритетными по отношению к целям конкретных агентов. При этом информация, предоставляемая агентами друг другу, должна быть исключительно достоверной.

По характеру взаимодействия с внешней средой агенты могут быть реактивными — не имеющими представления о внешней среде, собственных ресурсов, базы знаний и цели действия, а также интеллектуальными — постоянно накапливающими информацию о внешней среде и других агентах и способными к анализу информации. Именно построение универсального алгоритма работы между интеллектуальными аген-

тами, формирование интерактивной базы знаний и постоянно обучающегося центра подготовки решений и позволит создать аппаратное средство для ускоренной обработки входящих запросов, достоверных технико-коммерческих оценок и проектирования технологических процессов на базе постоянно пополняемой базы знаний и непрерывного машинного обучения<sup>5</sup>.

#### 4. Решение задачи оптимизации с применением теории графов

Практика применения ускоренной оценки трудоемкости входящего запроса предполагает способность производственной системы отображать пространство логических возможностей по всем переделам и операциям, выполнение которых может потребоваться при работе над входящим запросом. Если обратиться к литературоведению, то принято считать, что пространство возможностей литературных сюжетов конечно и сводится к узкому набору типовых, каждый из которых является не описанием одного события, а повествует о совокупности нескольких событий, в том числе различных по своей природе. Такая совокупность служит основой типового сюжета, повторяемость которого наблюдается во множестве, на первый взгляд, совершенно не похожих друг на друга литературных произведений. По такому же принципу множество изделий машиностроения производится с использованием ограниченного набора основных технологических переделов и совокупности групп оборудования в этих переделах. Пространство логических возможностей технологических переделов имеет привязки по группам к единицам имеющегося оборудования, либо к субподрядным возможностям, либо к их сочетаниям. Выбор необходимых переделов из исходного пространства возможностей происходит одновременно с семантическим анализом, когда требования к ДСЕ совмещаются с параметрами оборудования и специализированных рабочих мест с учетом критериев обеспечения качества. В свою очередь, набор комбинаций, где выполняются правила, формирует вариативное пространство альтернативных технологических цепочек, из которых посредством совокупности критериев определяются наиболее применимые. Если по собственным или субподрядным

возможностям соответствие не устанавливается, то рассматриваемый заказ в текущих условиях заведомо невыполним. Следует отказать от выполнения, что экономит трудовые и материальные ресурсы и исключает риск невыполнения контрактных обязательств.

Алгоритм семантического анализа и выявления соответствия необходимых технологических переделов группам оборудования можно интерпретировать в виде таблицы, в которой технологические переделы (ТП) перечислены в строках, а группы оборудования (ГО) — в столбцах (табл. 1).

В данной таблице каждому  $i$ -му ТП,  $i = 1, \dots, n$  соответствуют ячейки  $g_i, j, j = 1, \dots, m_i$ , представляющие собой  $j$ -е ГО. Для наглядного графического представления в ячейки помещены окружности: незакрашенные — незадействованные ГО; закрашенные одним цветом — ГО, задействованные в одной технологической цепочке; закрашенные двумя цветами — ГО, задействованные в двух технологических цепочках.

При оценке конкретного входящего запроса путем семантического анализа выявляется ряд соответствий ТП и ГО. Причем на один и тот же ТП может приходиться несколько разных ГО, например, когда одну и ту же группу операций можно выполнить на универсальных станках, обрабатывающем центре или с применением аддитивных технологий. В результате получают варианты технологических цепочек в виде укрупненных технологических маршрутов. В качестве примера на рис. 2 представлены два варианта технологических цепочек для изготовления одной детали [12].

Из укрупненных технологических маршрутов с учетом прописанных в системе правил технологической последовательности и запретительных комбинаций можно построить ориентированный граф (рис. 1). Его вершины — ГО, соответствующие различным ТП, а ребра — время, необходимое для выполнения заложенных в маршруты технологических переходов. Поскольку каждая из вершин есть комбинация конкретных ТП и ГО, вершинам можно присвоить индексы из двух цифр — по строке  $i$  и столбцу  $j$  (табл. 1).

ГО представляют собой очередное, хотя и ограниченное, пространство возможностей —

<sup>5</sup> Как преодолеть разобщенность между подразделениями? // WRIKE. URL: <https://www.wrike.com/ru/blog/kak-preodolet-razobshennost-mezhdu-podrazdeleniyami/?ysclid=lfhu2hu4yt292884141> (дата обращения: 10.03.2023).

по единицам оборудования (ЕО), находящимся в распоряжении предприятия, а также по кооперации. Каждая ЕО имеет идентификатор, определяющий соответствие  $i$ -му ТП и  $j$ -й ГО. Индекс определяет количество ЕО в данной ячейке ГО. Для упрощенного представления ЕО собственного и субподрядного производства сведены в один список. Таким образом, на каждую из вершин графа будет приходиться по несколько вариантов ЕО — собственного и субподрядного (рис. 2).

В приведенной схеме приходится на каждую из вершин графа варианты единиц оборудования обозначены квадратами и треугольниками с соответствующими индексами. Для упрощения визуализации квадраты обозначают собственные

единицы оборудования, а треугольники — оборудование по кооперации. Такое графическое представление позволяет каждому элементу маршрута присвоить трехзначный индекс, где первая цифра соответствует ТП, вторая — ГО, а третья — конкретной ЕО в собственном парке ли по субподряду. Легко видеть, что рассматриваемый входящий запрос можно выполнить несколькими путями, каждому из которых соответствуют свой технологический маршрут и определенные единицы оборудования. Для каждого из альтернативных вариантов можно построить свои ориентированные графы, вычислить трудоемкость и ресурсоемкость выполнения рассматриваемого заказа и выбрать наиболее приемлемые варианты технологических цепочек [13].

Таблица 1 / Table 1

Пространство возможностей по технологическим переделам и группам оборудования  
Possibility space by process stages and equipment groups

Технологические переделы / Technological subprocesses	Группы оборудования / Groups of equipment								
	1	2	3	4	5	6	7	$j$	$m_i$
1	○	○	●	●	○	○	○	$g_{1,j}$	○
2	○	○	○	○	○	○	○	$g_{2,j}$	○
3	○	●	○	●	○	●	○	$g_{3,j}$	○
4	○	○	○	●	●	○	○	$g_{4,j}$	○
5	○	○	●	○	○	●	○	$g_{5,j}$	○
6	○	○	○	○	○	○	○	$g_{6,j}$	○
$i$	$g_{i,1}$	$g_{i,2}$	$g_{i,3}$	$g_{i,4}$	$g_{i,5}$	$g_{i,6}$	$g_{i,7}$	$g_{i,j}$	$g_{i,m_j}$
$n$	○	○	○	○	○	○	○	$g_{n,j}$	○

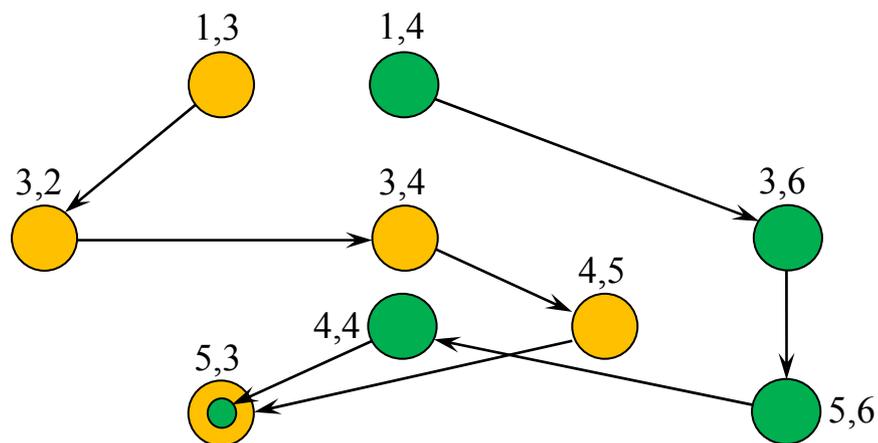
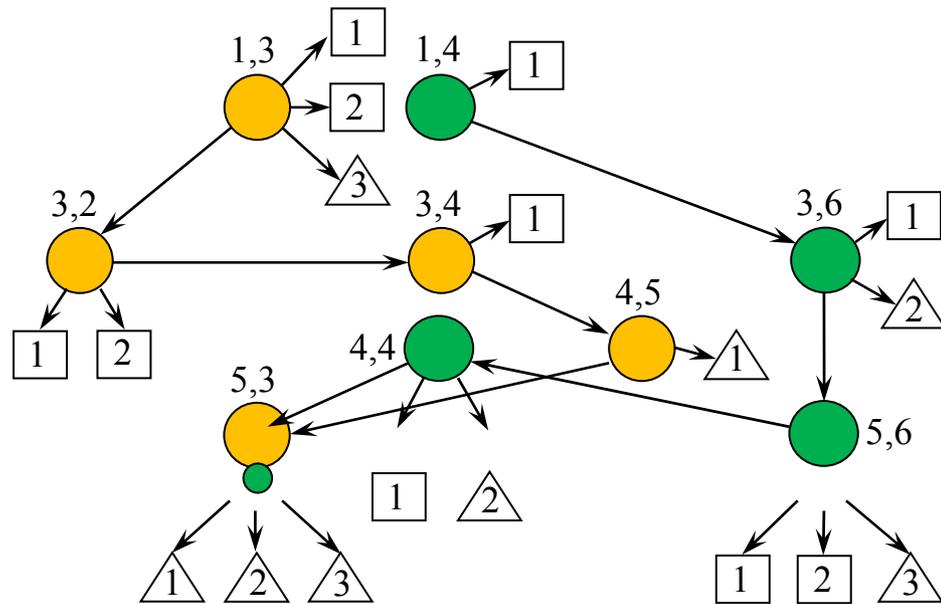


Рис. 1. Ориентированные графы укрупненных технологических маршрутов в соответствии с привязками к технологическим переделам и группам оборудования  
Figure 1. Oriented graphs of consolidated process routes according to links to process stages and equipment groups



**Рис. 2.** Ориентированные графы укрупненных технологических маршрутов с указанием конкретных единиц оборудования, имеющихся в распоряжении предприятия (□) или по кооперации (△)  
**Figure 2.** Orientation graphs of consolidated process routes, indicating specific pieces of equipment available to the company (□) or by cooperation (△)

При работе с большой номенклатурой технологически сложных изделий, изготовление которых предполагает тысячи различных операций, размерность задачи вырастает до таких масштабов, что решение ее силами одного специалиста или даже их группы в короткие сроки не представляется возможным. Именно поэтому укрупненное маршрутирование технологических процессов и оценка трудоемкости должны быть автоматизированы с помощью специального аппаратного средства. Это должна быть платформа, содержащая в себе информацию об имеющемся оборудовании, его параметрах, разрешенных и запрещенных технологических комбинациях и др. Система должна аккумулировать информацию по ранее оцененным и выполненным заказам — как касательно технологических цепочек, так и коммерческой эффективности. Более того, в систему следует вносить сведения, привязанные к коммерческим показателям, даже применительно к пилотным проектам и опытным разработкам. Накапливая все больше информации, система должна работать с ней, выявляя закономерности, определяя наиболее востребованную информацию и наиболее удачные подходы и ранжируя сведения, долгое время не востребованные.

По мере появления новых технологий и оборудования в устоявшиеся технологические цепочки должны вноситься изменения, чтобы повышать их эффективность и актуальность. В противном случае сохраняемые десятилетиями технологические цепочки превращаются в нечто аналогичное устаревшим ГОСТам — применяющимся документам, все менее соответствующим технологической действительности. Так, появление аддитивных технологий уже сегодня может рассматриваться как альтернатива традиционному подходу в производстве газовых турбин. В некоторых случаях их применение способнократно сократить стоимость и время выполнения работ.

## 5. Применение искусственных нейронных сетей

Что касается обучаемости системы, то большее значение имеет обеспечение ее способности не только аккумулировать данные по обработанным запросам и выполненным заказам, но и выявлять ассоциативные связи между ними. Кроме того, система должна распознавать в новых управленческих ситуациях (входящих запро-

сах) своего рода прецеденты по степени их сходства с уже принимавшимися конструкторскими, технологическими и управленческими решениями. Для этого системе требуется интегрирующий все процессы и данные блок управления, обеспечивающий также работу ассоциативной памяти.

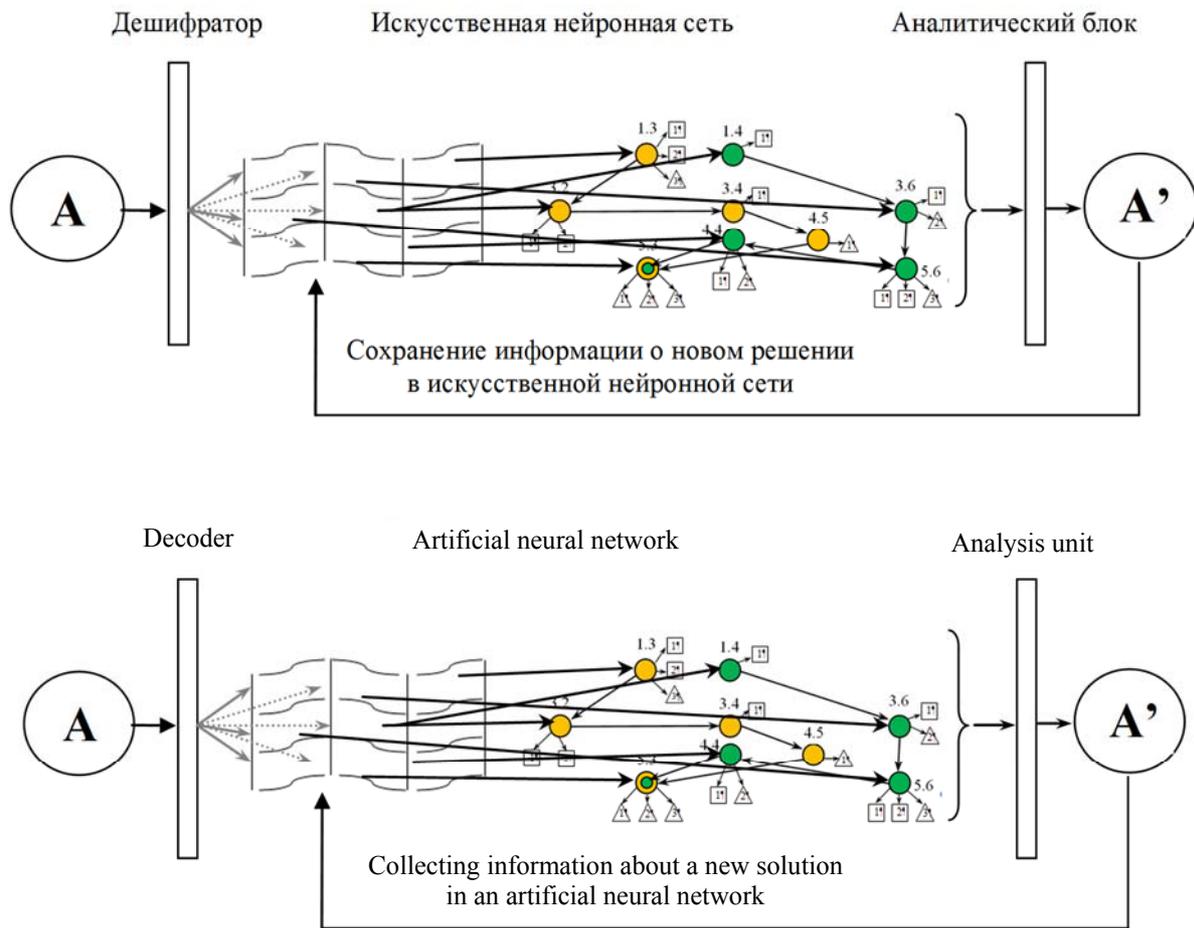
Для достижения таких целей в различных областях управления практикуется применение нейронных сетей. Именно искусственные нейронные сети предлагается применять в качестве средства обучаемости системы и распознавания управленческих ситуаций. При решении этой задачи необходимо также понимать, что множество данных, с которыми приходится работать в этом случае, — нечеткое, и искусственная нейронная сеть должна быть способна с таким множеством работать. Детальный алгоритм работы нейронных сетей применительно к обеспечению робастной работы системы менеджмента качества (СМК) подробно описан исследователями по профильному направлению и с каждым годом совершенствуется, повышая круг задач, которые можно решать с помощью искусственных нейронных сетей [13].

Предлагаемое решение с использованием искусственных нейронных сетей для производственной системы предприятия и СМК может выглядеть следующим образом. Систему предприятия, подобно мозгу человека, можно поделить на центры, отвечающие за определенные активности или, в нашем случае, технологические переделы и вспомогательные операции. Каждый из таких центров, в свою очередь, делится на участки, соответствующие иерархическому делению, спускаясь до искусственных нейронов, отвечающих за конкретную операцию. Каждый искусственный нейрон должен содержать в себе дискретный набор реакций и команд на входящие сигналы в соответствии со значениями диапазона. Так, любую управленческую ситуацию в среде предприятия можно рассматривать в качестве сигнала — как рассматривается входящая информация в нейронной сети. Этот сигнал содержит в себе определенный набор информации, отреагировать на которую и должна система после ее прохождения через нейронную сеть. Таким образом, входящий сигнал необходимо дешифровать или разделить на составляющие. На каждую составляющую сигнала в нейронной сети должен быть предусмотрен соответствующий центр, спо-

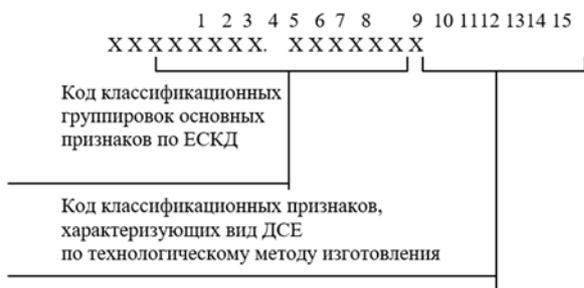
собный обработать приходящийся на него элемент сигнала и выдать соответствующую команду или реакцию. Такое распределение элементов сигнала по соответствующим участкам нейронной сети может работать по принципу ассоциативной памяти — когда сепаратор сигнала распознает, на каком из участков нейронной сети приходится данная часть сигнала. При этом, как и механизм ассоциативной памяти, этот узел системы должен быть обучаем, чтобы с учетом накапливаемого опыта системы такое распределение становилось все более точным. Для этого потребуется определенный модуль памяти, где такая информация будет накапливаться и структурироваться.

Затем, после распределения на центры или участки сети, составные элементы сигналов таким же образом должны распределиться по соответствующим искусственным нейронам — конечным звеньям сети. Здесь, в зависимости от заданного алгоритма, привязанного к диапазону сигнала, нейрон выдаст команду или реакцию, наиболее соответствующую данному элементу сигнала, то есть управленческой ситуации. По совокупности таких команд или реакций от отдельных нейронов и участков сети система — нейронная сеть — выведет общее решение, которое можно будет рекомендовать к принятию или принять автоматически. При этом в случае обнаружения недостатка в искусственных нейронах по тем или иным параметрам сигналов, ранее не отраженных, система может создать новые нейроны, а затем — их группы, чтобы улавливать новый диапазон сигналов, соответствующий определенным параметрам сигналов и свойствам системы. Вся эта информация должна накапливаться в блоке памяти системы и регулярно обрабатываться, чтобы можно было обеспечить обучаемость. В этом случае нейронная сеть станет самоорганизующейся системой, по структуре подобной картам Кохонена. Графически принцип работы такой системы применительно к рассматриваемому примеру представлен на рис. 3.

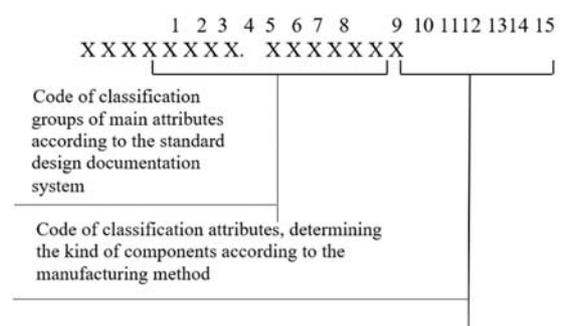
Как видно из схемы (рис. 4), в искусственной нейронной сети на каждый технологический передел (ТП) существует свой центр, в котором собирается информация о соответствующих группах оборудования (ГО), имеющихся в наличии и доступных по кооперации, а также данные о применимости к тем или иным материалам, деталям



**Рис. 3.** Алгоритм оценки входящего запроса по формированию технологических решений:  
 A — входящий запрос, A' — технологическое решение по входящему запросу  
**Figure 3.** Algorithm for assessing an incoming request to form a technological solution:  
 A — incoming request, A' — technological solution to the incoming request



**Рис. 4.** Структура кортежа данных ДСЕ в виде конструктивно-технологического кода



**Figure 4.** Structure of the component's data tuple as a design-engineering code

и сферам применения. В центрах искусственной нейронной сети также собирается информация о ТП и ГО, реализующих альтернативные технологии. На основании этих данных строится вариативное пространство описанных ранее графов. Аналитический блок сравнивает предложенные искусственной нейронной сетью варианты, оценивает их по критериям времени, трудоемкости, стоимости и выдает наиболее подходящее технологическое решение по заданным параметрам. В случае, если решение уникально и не встречалось ранее, данные о нем заносятся в банк знаний искусственной нейронной сети в соответствии с ее центрами, выполняя тем самым задачу по самообучению системы [14; 15]

Реализация на практике рассматриваемой концепции ускоренной обработки входящих запросов путем укрупненной оценки трудоемкости изготовления изделий по их конструкторско-технологическим признакам предполагает создание интегрированного аппаратного решения. Отдельные компоненты предлагаемого решения, их теоретическая база и возможности практической реализации на протяжении долгого времени изучаются российскими и зарубежными учеными. Некоторые подходы уже успешно реализованы в рамках программных продуктов или их выход на рынок ожидается в скором будущем. Тем не менее еще не создано интегрированное аппаратное решение, позволяющее мгновенно проанализировать запрос на изготовление машиностроительного изделия и предложить несколько предприятий отрасли, технически способных выполнить рассматриваемый заказ и обеспечить требуемый уровень качества в указанном временном и ценовом диапазоне.

## 6. Обзор актуальных подходов

Ускоренная оценка трудоемкости изделий по конструкторско-технологическим признакам рассматривалась в начале и середине 2000-х гг. исследователями Ижевского государственного технического университета А.И. Коршуновым, Е.В. Решетниковым и В.А. Кутергиным. В рамках исследований по автоматизации и управлению технологическими процессами и производствами в машиностроении А.И. Коршунов предлагает опираться на теорию конструкционно-технологической сложности для создания структурно-иерархической модели изделия и автома-

тизированной оценки трудоемкости ее изготовления на ее основе. Е.В. Решетников предлагает использовать нейросеть, способную производить геометрический анализ изделий и декомпозицию деталей на основе САД-моделей для автоматизированного расчета трудоемкости изготовления. В.А. Кутергин в своих работах продолжает концепцию применения теории конструкционно-технологической сложности, что также нашло практическое применение в программных продуктах, разработанных компанией BFG Group и имеющих Государственную регистрацию в Роспатент как «Программа для ЭВМ BFG СМТ (Технология поддержки принятия решений) номер свидетельства: 2018662164» и «Программа для ЭВМ BFG QRM (Технология управления производственной системой предприятия), номер свидетельства: 2018662311». Указанные программные средства позволяют создать имитационную модель производства и на ее основе делать прогнозы, анализировать возможные изменения производственной системы в ответ на внешние факторы, оптимизировать технологический процесс, обеспечивать внутрицеховую диспетчеризацию и проводить реинжиниринг производства. Для работы такой системы необходимы входные данные о номенклатуре выпускаемой продукции и возможных спецификациях, о парке оборудования и кадровых ресурсах, о технологических маршрутах с привязкой к оборудованию и о продолжительности операций. В результате система способна предлагать такие управленческие решения, которые позволят повысить производительность, снизить издержки и ускорить производственный цикл [16–18].

Лидерами российского рынка аппаратных средств для оптимизации производственных процессов, имитационного моделирования и проектирования технологических процессов выступают компании «АСКОН» (продукты «ВЕРТИКАЛЬ» и «КОМПАС») и «СПРУТ-Технология». Эти системы также позволяют повысить производительность, снизить издержки и сократить время производственных циклов, поэтому широко применяются на предприятиях с серийным производством и однородными технологическими процессами [19].

Наиболее фундаментально подход к оптимизации производства методом имитационного моделирования обосновывается учеными Санкт-Петербургского государственного политехничес-

кого университета им. Петра Великого под руководством А.И. Боровкова и реализуется на практике силами Центра компьютерного инжиниринга СПбПУ «CompMechLab». С помощью методов математического моделирования и графической визуализации А.И. Боровков предлагает создание «цифровых двойников» предприятий и «цифровых фабрик будущего», которые позволят моделировать, прогнозировать, оптимизировать и планировать производственные процессы в короткие сроки, с высокой точностью и минимальными затратами ресурсов [20].

### 7. Критика существующих подходов и концептуальное решение

В случае со специальным, общим и энергетическим машиностроением применение вышеупомянутых систем часто затруднено отсутствием технологического процесса, разработанного под конкретное предприятие. До решения задачи оптимизации сначала необходимо разработать хотя бы предварительный технологический процесс, который позволит обработать входящий запрос и подготовить технико-коммерческое предложение. Эти действия затратны по времени и кадровым ресурсам, что зачастую приводит к проблемам, описанным в начале статьи.

Для того чтобы автоматически определить принципиальную возможность изготовления изделия и разработать несколько альтернативных технологических маршрутов декомпозиция ДСЕ на геометрические примитивы, должна быть каким-то образом формализована в кортеж данных для проведения семантического анализа и сопоставления параметров ДСЕ с параметрами имеющегося оборудования. Сделать это можно с помощью расширенного классификатора ЕСКД, в который дополнительно включены параметры, характеризующие ДСЕ по технологическому методу изготовления<sup>6</sup>.

Полученный конструктивно-технологический код ДСЕ можно использовать для проведения семантического анализа по следующей логике, представленной на рис. 5.

Результаты семантического анализа параметров ДСЕ и производственных мощностей позволяют не только найти оптимальное решение для конкретного заказа, но и становятся базой для дальнейшего совершенствования технологического процесса и машинного обучения с использованием искусственных нейронных систем. В значительной степени реализация стратегии «Индустрия 4.0» базируется на создании процессов во всей производственной системе, а не на управлении отдельными единицами оборудования. Методом «наказаний и поощрений» единицы оборудования обучаются поиску таких комбинаций, которые способствуют достижению целевых показателей для всей производственной системы, а не для отдельных ее элементов. Для этого искусственная нейросеть позволяет предсказывать реакцию всей системы на предполагаемые действия с непрерывным повышением достоверности оценок. Одна из ведущих школ, занимающихся развитием машинного обучения с применением искусственных нейронных сетей, — Институт корпоративной кибернетики (Institut für Unternehmenskybernetik e.V.) в г. Аахен, Германия. Совместно с Союзом машиностроителей Германии (VDMA e.V.) Институт разрабатывает концепции управления производством с элементами искусственного интеллекта для различных отраслей в рамках стратегии «Индустрия 4.0». В машинном обучении Институт выделяет три подхода — контролируемое обучение с учителем (supervised learning), неконтролируемое обучение без учителя (unsupervised learning) и обучение с подкреплением (reinforcement learning) на базе взаимодействия машин со внешней средой с применением метода поощрений и наказаний. Основной упор в развитии механизмов машинного обучения делается на третий подход с целью внедрения этих механизмов на существующих производствах. Это требует глубокой интеграции в существующую производственную систему на физическом уровне посредством датчиков и коммуникационных устройств, позволяющих получать «цифровой двойник» производственной системы в реальном времени и предсказывать изменения ее состояния<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Машиностроение. 2020. 568 с.

<sup>7</sup> См.: Institut für Unternehmenskybernetik // Institut für Unternehmenskybernetike. V. URL: <https://ifu.rwth-aachen.de/> (accessed: 10.02.2023); Leitfaden Selbstlernende Produktionsprozesse. URL: <https://www.vdma.org/documents/34570/0/Leitfaden%20Selbstlernende%20Produktionsprozesse%20-%20KI.pdf/6eb1e986-f6dd-ec1c-6faf-515244bbf35f> (accessed: 10.02.2023).

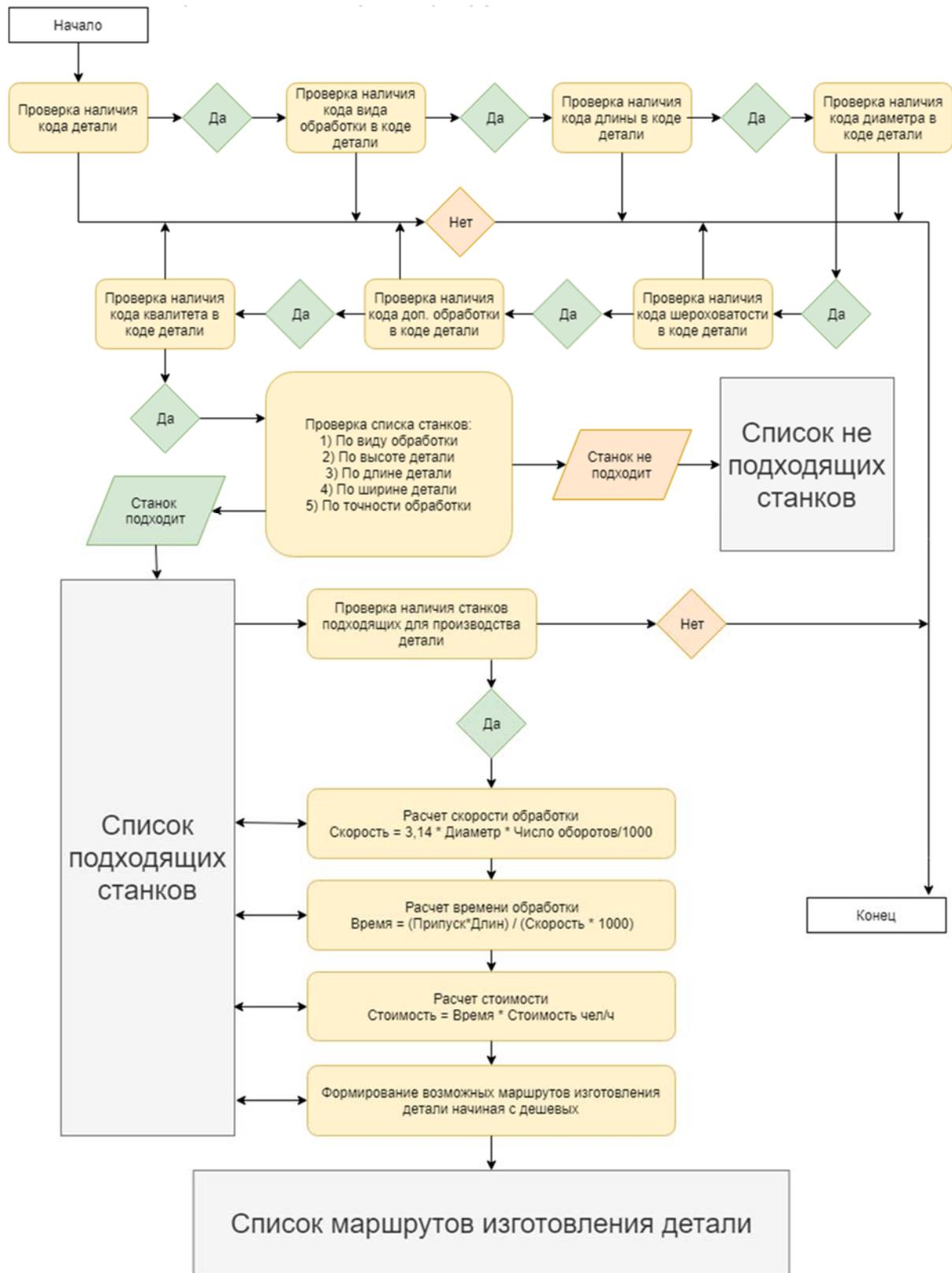


Рис. 5. Процесс подбора маршрутов изготовления детали

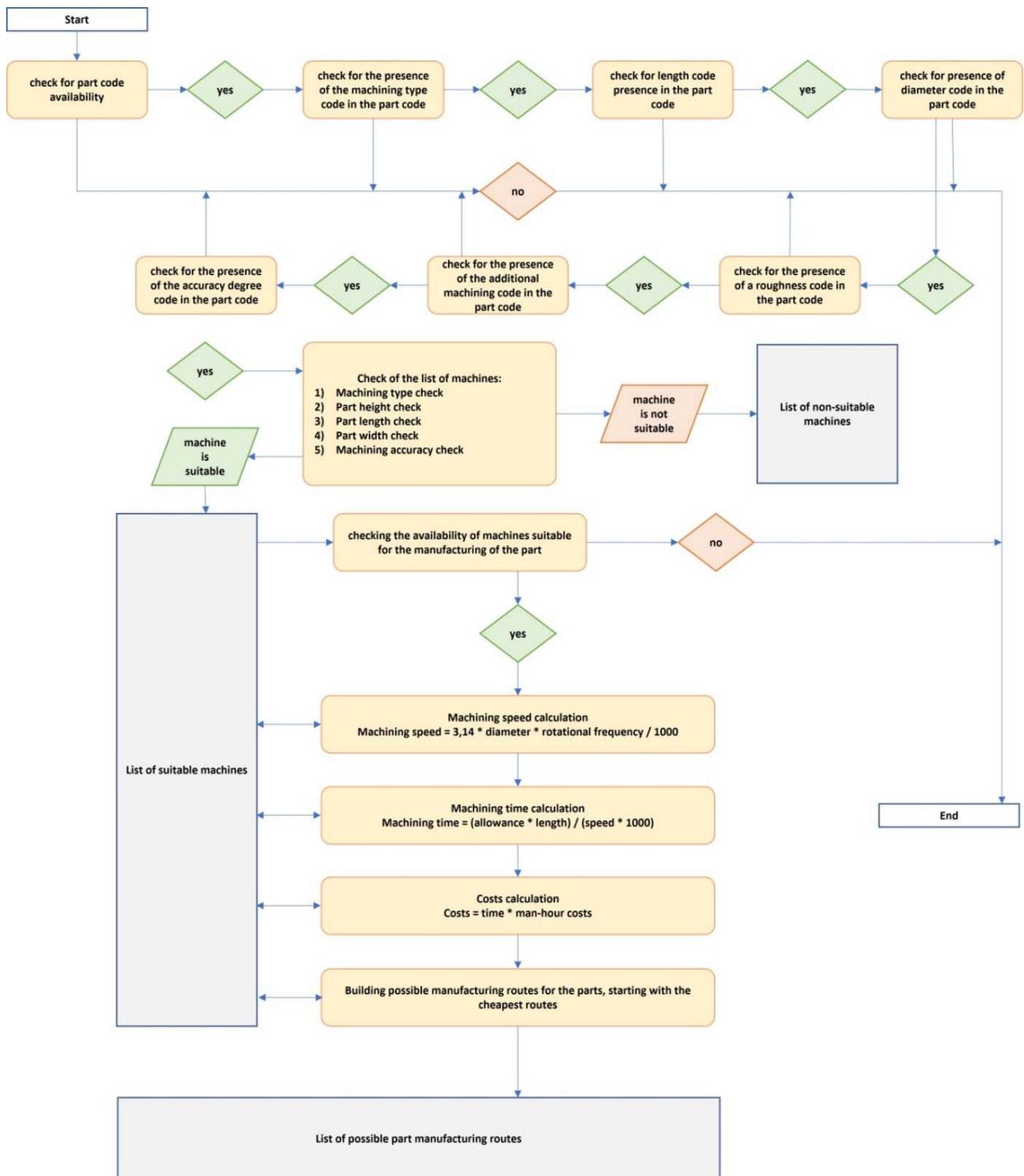


Figure 5. The process of selecting part manufacturing routes

Для решения проблем, сформулированных в начале статьи, обучение с подкреплением будет необходимо после построения аппаратного средства, позволяющего производить мгновенный и достоверный семантический анализ входящего запроса, строить возможные технологические маршруты и анализировать их в контексте накопленного отраслевого опыта. Для этого необходимо широкое применение первых двух подходов, в том числе в отношении накопленного и нецифровизованного опыта прошлых лет. Кроме того, для обеспечения максимальной скорости работы предлагаемой системы необходимо решение, позволяющее автоматически формировать конструктивно-технологический код детали на основе трехмерной модели, исполнительного чертежа, а в перспективе — графического изображения с указанием размеров и параметров изделия. Такая перспектива необходима для работы в условиях, когда к подготовке запроса невозможно привлечь квалифицированного инженера, например, в автономных условиях эксплуатации или когда речь идет о необходимости срочной замены изделий, произведенных десятки лет назад, на которые не осталось технической документации. В таких случаях необходим аппаратный инструмент, позволяющий с помощью лазерных лучей и рентгеновского излучения установить размеры и геометрическую форму изделия, а с помощью средств неразрушающего контроля определить материал, из которого оно изготовлено.

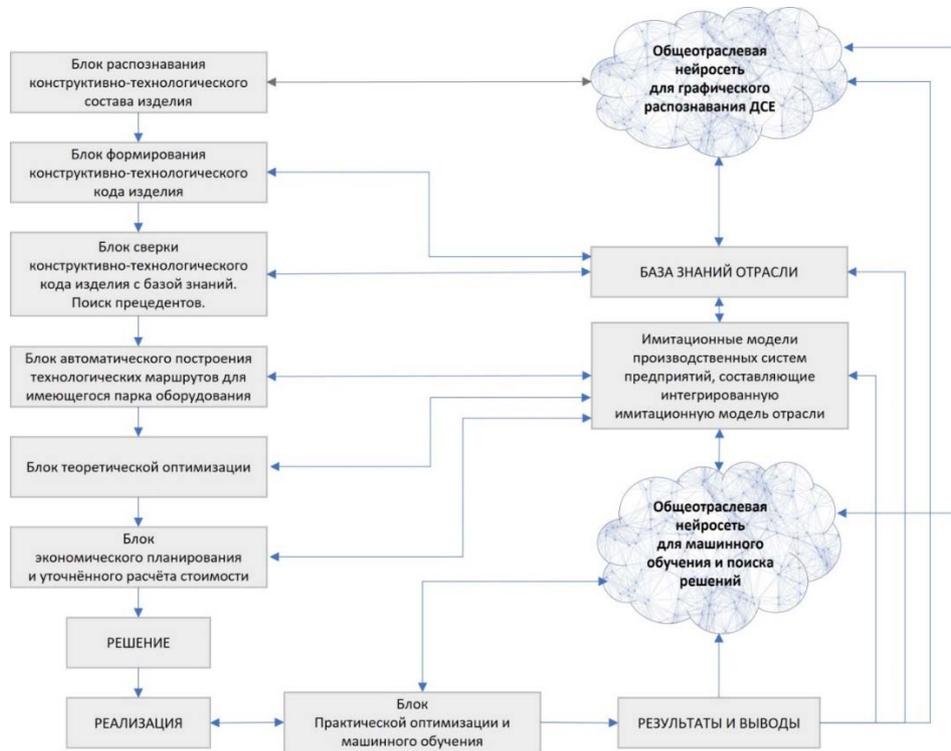
На сегодняшний день применение искусственных нейронных систем в инженерном деле изучается не только в направлении машинного обучения, оптимизации и имитационного моделирования, но и в направлении распознавания графических объектов — Optical Character Recognition (OCR). Практическое применение нейросетей в распознавании предметов, лиц, речи и голосов достигло больших успехов и вышло на массовый уровень, но решение задачи распознавания конструктивно-технологического состава ДСЕ, достаточного для автоматического построения технологического процесса, существенно сложнее. Существующие нейросети уже способны распознавать бумажные чертежи, выделять размерные линии, стрелки и заданные параметры,

и строить по имеющимся данным трехмерную модель. По трехмерной модели ДСЕ нейросеть уже способна построить ее информационную модель — первые наработки в этом направлении уже сделаны группой инженеров из Федерального технического университета Цюриха, Швейцария — на базе экспериментальной компании W24 Service GmbH в Мюнхене, Германия. Для этого опыта в создании аппаратного средства для решения обозначенных в начале статьи проблем необходимо создать программный инструмент, позволяющий автоматически формировать конструктивно-технологический код ДСЕ. Это позволит мгновенно строить технологические маршруты и сверять с базой накопленных знаний, решать задачу оптимизации и предлагать оптимальный путь выполнения заказа. В ходе выполнения заказа инструменты машинного обучения позволят оптимизировать процесс в реальном времени и пополнять базу знания предприятия и отрасли<sup>8</sup> [21].

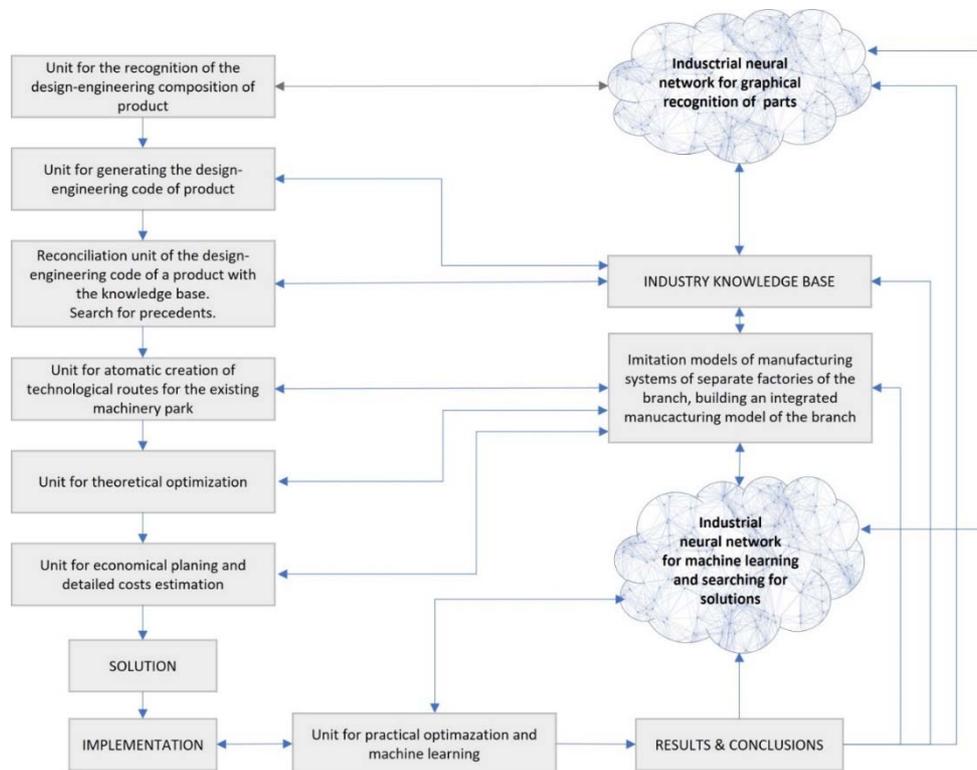
Предлагаемое аппаратное решение должно стать инструментом, который позволит выстроить структуру управления критически важной отраслью по схеме «заказчик и исполнители», где заказчиком выступает государство в лице министерства, федерального агентства, госкорпорации или другой структуры, а исполнителями — все предприятия отрасли, работающие в рамках данной системы. Такой подход обеспечит прозрачность, управляемость и надежность отрасли для заказчика в лице государства, снизит риски субъективных оценок, а также обеспечит предприятия регулярными заказами внутри отрасли при условии поддержания работоспособности производственных систем и непрерывного улучшения.

Внедрение системы должно предполагать отладку на мощностях первого опытного предприятия с последующим расширением на другие предприятия отрасли по мере устранения ошибок и уязвимых мест. Для внедрения необходима команда из специалистов трех типов — экспертов по производству, экспертов в области построения нейронных сетей и машинного обучения, а также инженеров-программистов. Поскольку система должна быть отраслевой, ее внедрением, отладкой и обслуживанием должна заниматься

<sup>8</sup> Automatically Check In-coming RFQs // W24 Service GmbH: URL: <https://werk24.io/product/feasibility-analysis-of-technicaldrawings> (accessed: 10.02.2023).



**Рис. 6.** Предполагаемая архитектура отраслевой системы автоматической обработки и распределения заказов с применением семантического анализа и искусственных нейросетей



**Figure 6.** The proposed architecture of an industry-wide automatic order processing and distribution system using semantic analysis and artificial neural networks

одна команда инженеров, работающая на единого заказчика в лице государственной структуры. По мере успешного внедрения команда инженеров будет перемещаться с одного предприятия на другое, пока не будут охвачены все предприятия отрасли. Управление системой должно осуществляться из единого центра, но не в режиме вертикально интегрированной структуры, а в качестве оператора, которому доступны функции контроля на всех уровнях. Перспективная архитектура предлагаемой системы представлена на рис. 6.

## Заключение

Несмотря на растущую цифровизацию экономики и появление средств автоматизации обработки запросов, проектирования технологических процессов и машинного обучения, отношения заказчиков и исполнителей в машиностроительной отрасли сохраняют субъективный характер. Имеющиеся программные средства позволяют повысить эффективность технологических процессов, снизить издержки и сократить время выполнения заказов, но не являются частью механизма принятия решения о заключении контрактов. Применяемый в государственных закупках Федеральный закон № 223<sup>9</sup> предполагает возможность участия в торгах любых поставщиков на условиях свободного рынка. В случае соответствия формальным критериям отбора и подачи коммерческого предложения с конкурентной ценой поставщиком имеет право стать любая организация. Соответствие предлагаемой цены и сроков поставки реальным возможностям предприятия — участника государственных закупок сложно проверить, и возникает риск срыва контрактных обязательств. Несоответствие поставляемых товаров и услуг требуемым параметрам приводит к невозможности обеспечения тех свойств продукции, которые необходимы для ее полноценного применения по назначению. Эта невозможность обеспечения качества продукции ограничивает технологические возможности целых отраслей, вынуждает импортировать критически важные изделия и ставит под угрозу технологический суверенитет государства.

Применение предложенного в статье решения для автоматизированного выбора подрядчи-

ков в машиностроительной отрасли позволит сократить упомянутые риски, но может потребовать отступления от механизма свободного рынка в пользу повышения надежности работы критически важных отраслей. Для этого может понадобиться создание единых отраслевых управляющих структур, в которые предприятия отрасли будут входить в качестве структурных подразделений. В таком случае отбор исполнителей можно будет проводить автоматически внутри единой структуры без проведения тендеров по Федеральному закону № 223.

Предложенный в статье подход, описанная концепция и логическая схема могут использоваться для построения многоуровневого программного инструмента автоматизированного внутриотраслевого управления.

## Список литературы

1. Миллер А.С. Электролиз доверия // Россия в глобальной политике. 2020. URL: <https://globalaffairs.ru/articles/elektroliz-doveriya/?ysclid=le5lkzogow692554795> (дата обращения: 10.02.2023)
2. Миллер А.С. Генерация лидерства // Изборский клуб. 2022. № 2–3(100–101). С. 90–101. URL: [https://izborsk-club.ru/magazine\\_files/2022\\_02.pdf](https://izborsk-club.ru/magazine_files/2022_02.pdf) (дата обращения: 10.02.2023)
3. Акулова Е. Директивное ценообразование: когда государство вмешивается в ценовую политику компании // Генеральный директор. Персональный журнал руководителя. URL: <https://www.gd.ru/articles/12032-direktivnoe-tsenoobrazovanie?ysclid=lf3841463r389327728> (дата обращения: 17.03.2023)
4. Годованник Л.Б. Верховный суд запретил Кировскому заводу задерживать поставки турбин для атомных ледоколов // Ведомости Санкт-Петербург. URL: <https://www.vedomosti-spb.ru/business/articles/2022/07/08/930539-verhovnii-sud-zapretil-kirovskomu-zavodu> (дата обращения: 09.02.2023)
5. Шамахов В.А., Ивченко Б.П. Обеспечение национальной безопасности в Арктической зоне Российской Федерации: монография. СПб.: ИПЦ СЗИУ РАН-ХиГС, 2019. 156 с.
6. Евсеев В.И. Экономические, промышленные и социальные системы современной России: состояние и их трансформации (2009–2020 гг.): монографический сборник избранных статей, рецензий, выступлений в СМИ, комментариев. СПб.: Фиарт, 2021. 338 с.

<sup>9</sup> Федеральный закон от 18.07.2011 N 223-ФЗ (ред. от 05.12.2022) «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.04.2023).

7. Васильков Д.В., Тариков И.Я., Миллер А.С. Проблемы оперативного запуска в производство заказов на предприятии под управлением системы менеджмента качества // *Металлообработка*. 2016. № 4 (94). С. 68–71. EDN: XBJSZS

8. Brent G. The Silo Mentality: How To Break Down The Barriers // *FORBES*. URL: <https://www.forbes.com/sites/brentgleeson/2013/10/02/the-silo-mentality-how-to-break-down-the-barriers/?sh=6260a2a8c7e9> (дата обращения: 10.03.2023)

9. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.

10. Бабаев А.В., Растренин Т.О. Беспилотные летательные аппараты. Групповая тактика // *Техника и вооружение*. 2021. № 5. С. 2–12.

11. Леонов А.В., Литвинов Г.А. Применение алгоритма пчелиной колонии BeeAdHoc для маршрутизации в FANET // *Вестник СибГУТИ*. 2018. № 1. С. 85–95.

12. Васильков Д.В., Тариков И.Я., Миллер А.С. Повышение надежности и оперативности производственной технологической системы за счет интеллектуальной оценки запросов с применением механизмов искусственных нейронных сетей // *Металлообработка*. 2017. № 3(99). С. 58–64.

13. Сочнев А.Н. Сети Петри с памятью состояний // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2016. № 9(4). С. 523–528. <https://www.doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-523-528>

14. Поезжалова С.Н., Селивано С.Г., Бородкина О.А., Кузнецова К.С. Рекуррентные нейронные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительного производства // *Вестник УГАТУ*. 2011. Т. 15. № 5(45). С. 36–46.

15. Kohonen T. *Self-Organizing Maps*. Springer Science & Business Media, 2012. 502 p.

16. Кутергин В.А. Инженерные теории с конструктивной точки зрения: множество геометрий и множество моделей искусственных объектов: монография. СПб.: Лань, 2015. 304 с.

17. Решетников Е.В. Разработка подсистемы геометрического анализа детали // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2008. № 1(11). С. 85–87.

18. Якимович Б.А., Коршунов А.И., Кузнецов А.П. Теоретические основы конструктивно-технологической сложности изделий и структур-стратегий производственных систем машиностроения. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2007. 279 с.

19. Евгеньев Г.Б. Российские технологии создания систем класса «Индустрия 4.0». Часть 2 // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 9(702). С. 18–27. <https://www.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-9-18-27>

20. Боровков А.И., Щербина Л.А., Марусева М.В., Рябов Ю.А. Мировая технологическая повестка и

глобальные тенденции развития промышленности в условиях цифровой экономики // *Инновации*. 2018. № 12 (242). С. 34–42.

21. Kim K.-Y., Monplaisir L., Rickli J. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus. Proceedings of FAIM: International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, June 19–23, 2022, Detroit, Michigan, USA, 2023. 414 p.

## References

1. Miller AS. Electrolysis of trust. *Russia in global politics*. 2020. (In Russ.) Available from: <https://globalaffairs.ru/articles/elektroliz-doveriya/?ysclid=le5lkzogow692554795> (accessed: 10.02.2023)

2. Miller AS. Leadership generation. *Izborsky Club*. 2022;2–3(100–101):90–101. (In Russ.) Available from: [https://izborsk-club.ru/magazine\\_files/2022\\_02.pdf](https://izborsk-club.ru/magazine_files/2022_02.pdf) (accessed: 10.02.2023)

3. Akulova E. Directive pricing: when the state intervenes in the pricing policy of the company. *General manager. Personal journal of the manager*. Available from: <https://www.gd.ru/articles/12032-direktivnoe-tseno-obrazovanie?ysclid=lf3841463r389327728> (accessed: 17.03.2023)

4. Godovannik LB. The Supreme Court has banned the Kirov Plant from delaying the supply of turbines for nuclear icebreakers. *Vedomosti Sankt-Peterburg*. Available from: <https://www.vedomosti-spb.ru/business/articles/2022/07/08/930539-verhovnii-sud-zapretil-kirovskomuzavodu> (accessed: 09.02.2023).

5. Shamakhov VA, Ivchenko BP. *Ensuring national security in the Arctic zone of the Russian Federation: monograph*. St. Petersburg: IPCz SZIU RANXiGS Publ.; 2019. (In Russ.)

6. Evseev VI. *Economic, Industrial and Social Systems of Modern Russia: State and Transformations (2009–2020): collection of selected articles, reviews, media publications, comments*. St. Petersburg: Fiart Publ.; 2021. (In Russ.)

7. Vasilkov DV, Tarikov IYa, Miller AS. Problems of expeditious start in production of orders at the enterprise under control of quality management system. *Metalworking*. 2016;4(94):68–71. EDN: XBJSZS

8. Brent G. The Silo Mentality: How To Break Down The Barriers. *Forbes*. 2013. Available from: <https://www.forbes.com/sites/brentgleeson/2013/10/02/the-silo-mentality-how-to-break-down-the-barriers/?sh=6260a2a8c7e9> (accessed: 10.03.2023).

9. Tsetlin M.L. *Research on the theory of automata and modeling of biological systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1969. (In Russ.)

10. Babaev A.V., Rastrenin T.O. Беспилотный летательный аппарат. Групповая тактика. *Техника и вооружение [Equipment and weapons]*. 2021;5:2–12. (In Russ.)

11. Leonov A, Litvinov G. Application of the beehive colony algorithm for routing to fanet. *Vestnik SibGUTI*. 2018;1:85–95. (In Russ.)
12. Vasilkov DV., Tarikov IY, Miller AS. Increase of reliability and efficiency of production technological system at the expense of an intellectual assessment of inquiries with use of mechanisms of artificial neural networks. *Metalworking*. 2017;3(99):58–64. (In Russ.)
13. Sochnev AN. Petri nets with the states memory. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*. 2016;9(4):523–528. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-523-528>
14. Poezjalova SN, Selivanov SG, Borodkina OA, Kuznetsova KS. Recurrent neural networks and optimization methods of technological processes in the automated systems of technological preparation machine-building production. *Vestnik UGATU (Scientific journal of Ufa University of Science and Technology)*. 2011;15(5(45)): 36–46. (In Russ.) Available from: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_18863029\\_88275887.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18863029_88275887.pdf) (accessed: 10.03.2023)
15. Kohonen T. *Self-Organizing Maps*. Springer Science & Business Media, 2012.
16. Kutergin VA. *Engineering theories from a constructive point of view: a set of geometries and a set of models of artificial objects*. St. Petersburg: Lan Publ.; 2015. (In Russ.)
17. Reshetnikov EV. Development of a subsystem for geometric analysis of a part. *Intelligent systems in manufacturing*. 2008;1(11):85–87. (In Russ.)
18. Yakimovich BA, Korshunov AI, Kuznetsov AP. *Theoretical foundations of the structural and technological complexity of products and structural strategies of production systems of mechanical engineering*. Izhevsk: IzhSTU Publ.; 2007. (In Russ.)
19. Eugenev GB. Russian technologies for creation of industry 4.0 systems. Part 2. *BMSTU journal of mechanical engineering*. 2018;9(702):18–27. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.18698/0536-1044-2018-9-18-27>
20. Borovkov AI, Shcherbina LA, Maruseva VM, Ryabov Yu.A. World technology agenda and global industrial trends in the digital economy. *Innovations*. 2018;12(242):34–42. (In Russ.) EDN: VWDZYS
21. Kim K-Y, Monplaisir L, Rickli J. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus. *Proceedings of FAIM: International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, June 19–23, 2022, Detroit, Michigan, USA, 2023.

#### Сведения об авторе

**Миллер Андрей Сергеевич**, генеральный директор Балтик Винд Групп, Гамбург, Германия; ORCID: 0009-0003-3883-9557; E-mail: [a.miller@baltic-wind.de](mailto:a.miller@baltic-wind.de)

#### About the author

**Andrej S. Miller**, General Manager, Baltic Wind Group, Hamburg, Germany; ORCID: 0009-0003-3883-9557; E-mail: [a.miller@baltic-wind.de](mailto:a.miller@baltic-wind.de)



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-262-270  
EDN: TNDZIX  
UDC 004

Research article / Научная статья

## Comparison analysis of AI-based smartphone applications for self-examination of skin cancer risk

Stepan S. Korotkiy<sup>a</sup> , Olga A. Saltykova<sup>a</sup> , Andrey O. Ukharov<sup>b</sup> ,  
Irena L. Shlivko<sup>c</sup> , Irina A. Klemenova<sup>c</sup> , Oxana E. Garanina<sup>c</sup> ,  
Kseniia A. Uskova<sup>c</sup> , Anna M. Mironycheva<sup>c</sup> , Yana L. Stepanova<sup>c</sup> 

<sup>a</sup>RUDN University, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>c</sup>Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

✉ skorotkiy@gmail.com

### Article history

Received: May 20, 2023  
Revised: September 18, 2023  
Accepted: September 19, 2023

### Keywords:

Artificial Intelligence, AI, Neural network, Smartphone application, Skin cancer, Skin self-examination, ProRodinki, SkinVision, Skinive, Risk assessment.

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### For citation

Korotkiy SS, Saltykova OA, Ukharov AO, Shlivko IL, Klemenova IA, Garanina OE, Uskova KA, Mironycheva AM, Stepanova YL. Comparison analysis of AI-based smartphone applications for self-examination of skin cancer risk. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):262–270. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-262-270>

**Abstract.** A comparative analysis of 3 AI-based smartphone applications for self-service skin cancer risk assessment: ProRodinki, Skinive and Skin Vision. Analysis consists of description of applications and its ways of work, and results, such as sensitivity and specificity, done on the base of the practical experiment conducted with processing 516 images of the skin neoplasms and pathologies confirmed by histological research via each app. Every application is unique and differs from each other by its principles or work, algorithms, user experience and design, and of course AI model and the set of input data that is analyzed by neural networks. Current research and practical experiment were made with focus on images processing and the app risk assessment for each of the image, other details and mole prescription information were set neutral. This leads to a conclusion that there is a lack of methodology for testing and analysis of different AI-based applications and services. Having such methodology, the comparison analysis results can be more objective and transparent.



## Сравнительный анализ смартфон-приложений на базе искусственного интеллекта для самостоятельной оценки риска рака кожи

С.С. Короткий<sup>a</sup> , О.А. Салтыкова<sup>a</sup> , А.О. Ухаров<sup>b</sup> ,  
И.Л. Шливко<sup>c</sup> , И.А. Клеменова<sup>c</sup> , О.Е. Гаранина<sup>c</sup> , К.А. Ускова<sup>c</sup> ,  
А.М. Миронычева<sup>c</sup> , Я.Л. Степанова<sup>c</sup> 

<sup>a</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

<sup>b</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

<sup>c</sup> Приволжский исследовательский медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации,  
Нижний Новгород, Российская Федерация

✉ skorotkiy@gmail.com

### История статьи

Поступила в редакцию: 20 мая 2023 г.

Доработана: 18 сентября 2023 г.

Принята к публикации: 19 сентября 2023 г.

### Ключевые слова:

искусственный интеллект, нейронные сети, смартфон приложения, рак кожи, самостоятельная диагностика, оценка риска

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Для цитирования

Korotkiy SS, Saltykova OA, Ukharov AO, Shlivko IL, Klemenova IA, Garanina OE, Uskova KA, Mironycheva AM, Stepanova YL. Comparison analysis of AI-based smartphone applications for self-examination of skin cancer risk // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 262–270. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-262-270>

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ трех смартфон-приложений на базе искусственного интеллекта для самостоятельной оценки риска рака кожи: ProRodinki, Skinive и SkinVision. Анализ включает описание приложений и их методы работы, а также результаты, такие как чувствительность и специфичность, полученные в ходе практического эксперимента с обработкой 516 изображений новообразований кожи и патологий, подтвержденных гистологическими исследованиями, через каждое приложение. Каждое приложение уникально и отличается от других своими принципами работы, алгоритмами, пользовательским опытом, дизайном и, конечно же, моделью искусственного интеллекта и набором входных данных, которые анализируются нейронными сетями. Настоящее исследование и практический эксперимент были проведены с упором на обработку изображений и оценку риска приложения для каждого из изображений новообразований, другая информация о новообразованиях была представлена нейтральной. Результаты эксперимента приводят к выводу о нехватке методологии для тестирования и анализа различных смартфон-приложений на базе искусственного интеллекта. Имея данную методологию, результаты сравнительного анализа могут быть более объективными и прозрачными.

### Introduction

According to [1–3], skin cancer prevalence rate is increasing globally, outpacing almost all other types of cancer. There are the following main types of skin cancer: Basal cell carcinoma (BCC) with 80 % share of total skin cancers, Squamous cell carcinoma (SCC) with about 19 % share and Melanoma, which accounts for approximately 1 % of total skin cancers. The most dangerous and aggressive one is melanoma, which causes a majority of skin cancer deaths [4].

Early detection and treatment significantly increase the chances for recovery and do require less

financial investments for therapy compared to the case where detection was done on the latest stages [5]. It is a challenge to detect the skin cancer on early stages due to the fact that it usually starts to progress with a change in a skin and absence of any other noticeable symptoms [6].

Screening method using AI-based smartphone applications (“apps”) for risk assessment of skin cancer seems to have a great potential to provide earlier and more accurate guidance on a particular skin lesion or change [7–10]. The skin self-examination can be conducted at home and doesn’t require special conditions. It’s affordable, convenient and instant way to get an immediate recommendation

on next steps and decrease the risks of skin cancer. However, it’s crucial to remember that apps cannot be an alternative to dermatologists and oncologists. AI technology and apps aim to help and give an advice, but not to replace the professional doctors.

There is a number of apps using machine learning algorithms to provide self-service skin cancer risk assessment. And this number is demonstrating double digit growth: between 2014 and 2017, more than 200 new apps in dermatology field were developed and available for download [11]. This trend is becoming even stronger, considering the increasing use of apps and AI technology [12]. Widespread usage of these apps must be supported by a robust evidence base [13; 14], which is the main objective of this work — to compare smartphone applications main principles of work and conduct the practical study in skin cancer detection and risk assessment for each of the app.

Comparative analysis of three AI-based smartphone applications was conducted: ProRodinki, Skinive and SkinVision. The research consists of user experience overview and practical study to evaluate the level of quality of risk assessment.

### 1. Materials and methods

It was decided to conduct this comparative analysis with the following applications: the leading skin cancer risk assessment application in Russian Federation — ProRodinki, the leading one in Europe — SkinVision, and Skinive — the application available in both, Russia and Europe. High-level overview on ProRodinki, Skinive and SkinVision solutions, country origin and monetization model are listed in Table 1 below.

Comparison analysis study is conducted using ProRodinki app, Skinive app for home use and SkinVision app. All other solutions/products are out of scope of this work.

Dataset for comparison study consists of 516 images of the skin neoplasms and pathologies confirmed by histological research. None of the dataset images are known to be a part of training dataset for any neural network scoped for current research. There are 328 (~64%) benign skin neoplasms and 188 (~36%) malignant cases. Benign group of images is represented by Nevus, Heman-gioma and Seborrheic keratosis (SK). Malignant group consists of BCC, SCC and Melanoma images.

Beside the description of screening flows and apps itself, the confusion matrix for binary classification [15] is used for each application study result. There are two class labels — malignant (positive) and benign (negative). The confusion matrix is listed in Figure 1.

Based on the confusion matrix results (True Positive — *TP*, False Negative — *FN*, False Positive — *FP*, True Negative — *TN*), the sensitivity and specificity metrics are calculated respectively.

*Sensitivity* means “out of all actual malignant neoplasms, how many malignant ones were predicted”, which is calculated using the following formula:

$$Sensitivity = TP / (TP + FN)$$

*Specificity* means “out of all actual benign cases, how many benign moles were predicted”. This metric is calculated by the following formula:

$$Specificity = TN / (TN + FP)$$

### 2. Results

Comparative analysis results are listed below — it contains the description of each app and its screening flows, study practical steps description and results.

Table 1

Projects overview — products, monetization models

Project	Country origin	Website	Products / Solutions	Free / Paid
ProRodinki	Russia	<a href="https://www.prorodinki.ru/">https://www.prorodinki.ru/</a>	1. App	Free, paid expert advice
Skinive	Belarus, Netherlands	<a href="https://skinive.ru/">https://skinive.ru/</a> <a href="https://skinive.com/">https://skinive.com/</a>	1. App for home use 2. App for clinicians 3. API for integration	Paid subscription, Free trial 10 screenings
SkinVision	Netherlands	<a href="https://www.skinvision.com/">https://www.skinvision.com/</a>	1. App	No free trial, paid single check or subscription plan

		PREDICTED	
		POSITIVE Malignant (BCC, SCC, Melanoma)	NEGATIVE Benign (Nevus, Hemangioma, SK)
GROUND-TRUTH	POSITIVE Malignant (BCC, SCC, Melanoma)	TRUE POSITIVE	FALSE NEGATIVE
	NEGATIVE Benign (Nevus, Hemangioma, SK)	FALSE POSITIVE	TRUE NEGATIVE

Figure 1. Confusion matrix

### 2.1. ProRodinki app

Application developers are *AIMED, LLC* (Russian Federation, Moscow, 121205, Skolkovo Innovation Center, Noble st., 7, floor 2, sec. 58 RB 2) and *Privolzhsky Research Medical University* (Russian Federation, Nizhny Novgorod, 603005, 10/1 Minin and Pozharsky Square).

The app was released in 2020, available for Russian Federation. Product localization is made in Russian and English languages. Can be installed on smartphones and tablets with iOS or Android. The application is updating approximately once a month, last version update made on 20<sup>th</sup> of February 2023.

Rosdravnadzor of Russian Federation marking (№ KP-20-006 dated from 14<sup>th</sup> of April 2020) was applied to allow application usage as non-medical

software for informational and educational purposes including the recommendation to doctors.

The following introduction is presented on ProRodinki website<sup>1</sup>:

“Prorodinki is skin cancer detection app powered by AI that determines the likelihood of melanoma and basal cell skin cancer based on a mole photo and risk factors. It generates personal recommendations to visit a doctor if required. The analysis is done by a neural network, built and trained on several thousand diagnosed cases and working under the permanent dermatology expert’s supervision.”

ProRodinki application possess themselves as the combination of artificial intelligence technology and professional doctors’ supervision, that provides a recommendation for further action and not make a diagnosis.

Successful screening user experience flow is presented in Figure 2 and contains 6 steps. Every skin self-assessment is happening with mole localization and prescription data specification (Steps 1–3). The mole image can be taken using smartphone camera or uploaded from the gallery (Step 4). App checks the image quality and highlights the detected moles in case if the image quality is appropriate (Step 5). And on final stage (Step 6) user can see the neural network recommendation and the option to purchase a control opinion of real doctor.

It is important to mention that the results of neural network are monitored by real doctors and ProRodinki app can send an additional follow-up with updated recommendation later on.

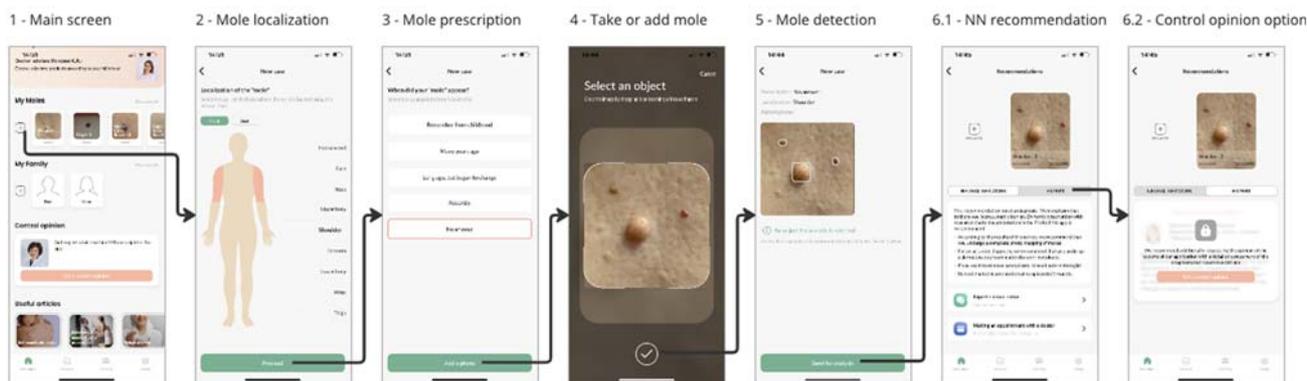
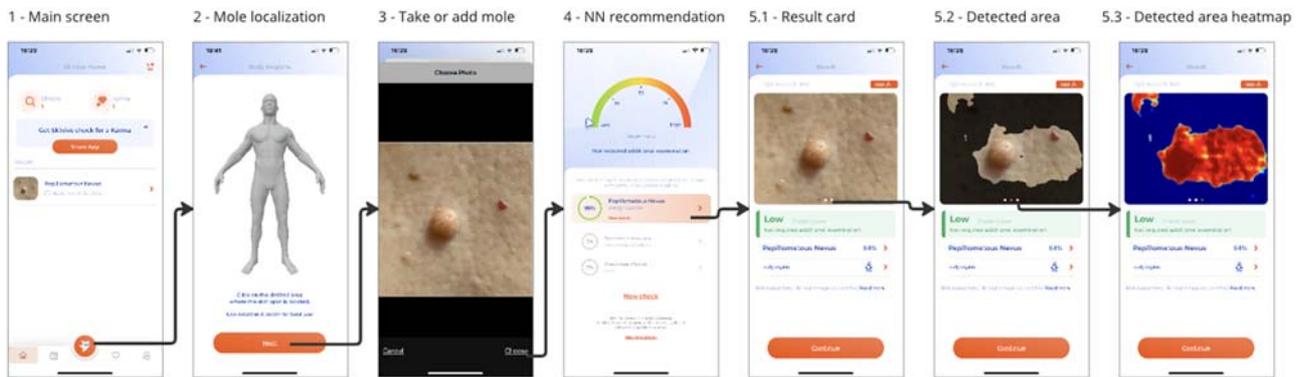


Figure 2. ProRodinki screening flow

<sup>1</sup> ProRodinki website. Available from: <https://www.prorodinki.ru> (accessed: 17.01.2023).



**Figure 3.** Skinive screening flow

## 2.2. Skinive app

Application developers are *Skinive Holding B.V.* (The Netherlands, Amsterdam) and *Wise AI, LLC* (Belarus, Minsk).

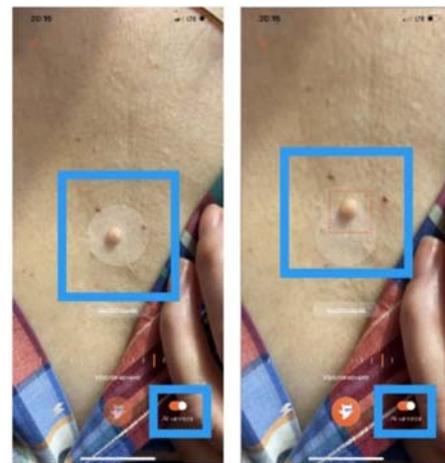
Company Skinive was founded in 2020. The app was released in October 2022, available worldwide except US and Canada. Product localization is made in 8 languages: Russian, English, French, German, Hindi, Bangla, Portuguese and Spanish. Can be installed to smartphones with iOS or Android. The application is updating once a month, last version update made on 22<sup>nd</sup> of March 2023.

The following information is presented on Skinive website regarding certification<sup>2</sup>: “Skinive solutions are CE marked and meet all regulatory requirements for medical device class. Skinive is a Class 1 medical device that uses clinically proven technology. Moreover, Skinive company has an ISO13485 Certificate, which confirms compliance with the requirements of regulators for the quality management system of medical device manufacturers.”

The following introduction is presented on Skinive website: “Skinive is a convenient way to detect and assess skin disease risks with your smartphone! Simply take a photo of the skin pathology and send it to the Skinive app for timely analysis. Skinive checkup: — Increases the detection rate of skin diseases with instant screening; — Fewer referrals to specialists thanks to primary screening at home; — Reduce the cost of identifying skin conditions when not necessary; — Reduces the cost of treatment by detecting diseases at earlier stages; — Skinive also lets you store photos to track

changes over time, helping you closely monitor your health over the long term.”

Noticeable that Skinive provides several smartphone applications — app for home use and app for medical professionals. The app for medical professionals is out of scope of current work and mainly different from the app for home use with capabilities of patient management (ability to create patients with its skin profiles and screen moles for the particular patient).



**Figure 4.** Take mole using Skinive AI camera capability

Successful screening user experience flow is presented in Figure 3 and contains 5 steps. Every skin check requires a mole localization (Steps 1–2). The mole image can be taken using smartphone camera or be uploaded from the gallery (Step 3). Taking the mole via camera can be done with AI mode on,

<sup>2</sup> Skinive website. Available from: <https://skinive.com> (accessed: 17.01.2023).

which allows to take a mole only if Skinive app detects the mole area highlighting it with a red square. 2 examples of app screens are shown in the Figure 4 to demonstrate the AI mode for Skinive mole detection. Steps 4 and 5 in Figure 3 are showing the recommendation with risk assessment level and top-3 diseases with formation classes and sign percentage for each disease.

No additional follow-up recommendations or updates are received from Skinive app after check was done.

### 2.3. SkinVision app

Application developer is *SkinVision B.V.* (Barbara Strozziilaan 201, NL-1083 HN Amsterdam, Netherlands).

Company SkinVision was founded in 2011. The app was released in 2014, available worldwide. Product localization is made in 7 languages: English, Dutch, French, German, Italian, Polish, Spanish. Can be installed on smartphones with iOS or Android. The application is updating every 1–3 months, last version update made on 27<sup>th</sup> of February 2023.

The following information is presented on SkinVision website regarding certification<sup>3</sup>: “We are a regulated medical device with European CE marking. We are ISO certified for medical device and information security management.”

The following introduction is presented on SkinVision website<sup>4</sup>: “SkinVision is a regulated medical service that takes control over your skin health to a new level. It expands your ability to self-

examine your skin and elevates your knowledge when to act, how and why. It is designed to provide accurate and timely skin cancer detection, along with the most reliable personalised skin health advice and health path recommendation. At the centre of the service is the SkinVision app, which is a regulated medical device that merges AI technology with the expertise of skin health professionals and dermatologists. SkinVision is a service of choice whether you want to address your most immediate concerns, learn what steps you should take next, understand your skin risk profile and introduce the most intelligent skin health regime to your seasonal rhythm.”

Successful screening user experience flow is presented in Figure 5 and contains 6 steps. Every skin self-assessment starts with mole localization (Steps 1–2). The mole image can be taken using smartphone camera only (Step 3). There is no option to upload the mole image from smartphone gallery and the mole detection is processed via smartphone camera considering 3 main requirements: mole to be detected, clear and in focus. The progress bar for mole detection is shown as a blue circle in the center of app screen and take mole event is happening automatically when detection is done. After the confirmation of mole image (Step 4) the app asks for prescription details (Step 5) and then AI analysis begin (Step 5.1). Final stage (Step 6) is the neural network recommendation with risk assessment.

It is important to mention that the results of neural network are monitored by real doctors and SkinVision app can send an additional follow-up with updated recommendation later on.

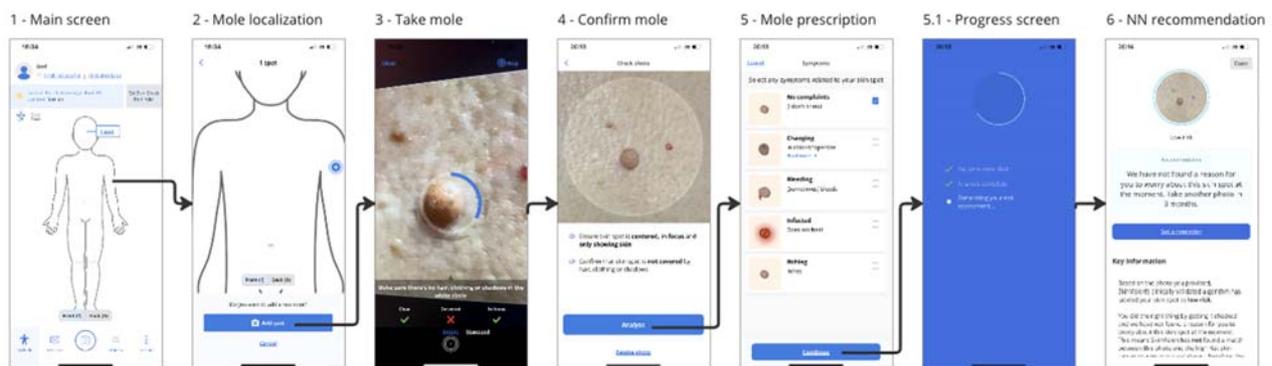


Figure 5. SkinVision screening flow

<sup>3</sup> SkinVision website. Available from: <https://www.skinvision.com> (accessed: 17.01.223).

**2.4. Study**

Every dataset image was processed by each app: ProRodinki (versions for iOS: 5.2.1, 5.2.3), Skinive for home use (version for Android 1.0.13 and versions for iOS: 1.0.6, 1.0.7) and SkinVision (version for iOS: 6.20.1). Total number of test cases is 1 548.

To run the test, the upload image from smart phone gallery capability was used for ProRodinki and Skinive apps. Meanwhile, the SkinVision app was used to take a photo of the neoplasm image showed on the display with 13.3In size, 2560x1600 resolution and 4 096 000 pixels.

Due to the fact that Interpretation of results with risk assessment is vary for different apps, the results were aligned to the common binary format — test cases classified by Skinive as low and medium risk levels are considered to be equal to low risk assessment made by ProRodinki and SkinVision. High risk results didn’t require any additional manipulations for alignment.

Each app has its own algorithms of image quality validation and detection. According to current study, not all dataset images were processed successfully and there is a number of unprocessed test cases listed in Table 2. The rest of images were processed successfully.

The experiment results with calculated sensitivity and specificity metrics are provided in Table 3.

Listed results reflect the instant AI-based smartphone app recommendations only and do not consider the follow-ups received later after a professional doctor check.

Table 2

**Failed screenings split by apps**

UNRECOGNIZED	ProRodinki	Skinive	SkinVision
Malignant	8	23	18
Benign	5	19	18
<b>Total</b>	13	42	36

Table 3

**Study results**

n = 516	ProRodinki	Skinive	SkinVision
TP	161	99	161
FP	19	22	170
TN	295	287	139
FN	28	66	9
<b>Sensitivity</b>	<b>85.19%</b>	<b>60.00%</b>	<b>94.71%</b>
<b>Specificity</b>	<b>93.95%</b>	<b>92.88%</b>	<b>44.98%</b>

**3. Discussion**

The highest sensitivity was demonstrated by SkinVision application — almost 95%. Meanwhile, the specificity metric has the lowest result — lower than 45 %. The assumption can be made that this configuration of SkinVision AI is made in the way to minimize the risk of missing malignant neoplasm and minimize the potential legal risks related to the wrong recommendation. It is important to emphasize that the study was made by taking the photos from the display, which might bring the certain distortion to the results. Low rate in specificity metric is mitigated well via follow-up by professional doctors.

Skinive app provides the most informative results and recommendations — according to the information published on their website, there are 51 skin pathologies that can be recognized. It is definitely a challenge to train the neural network for such a significant skin disease nomenclature and presumably this can be a reason for high number of False Negatives equal to 66 and the sensitivity metric on the level of 60%. At the same time, the specificity rate is almost 93%. Skinive develops the app for doctors and such an informative way of results interpretation does seem to be very promising in combination with competence and experience doctor.

ProRodinki AI-based smartphone application has demonstrated the best balance of sensitivity and specificity rates — 85 % and almost 94 % respectively. In common with SkinVision, there is a tight connection between AI technology and team of professional doctors who supervise and monitor the recommendations made by app.

**Conclusions**

The research around AI-based smartphone applications available for skin cancer risk assessment has been conducted and 3 applications were chosen for comparison analysis: ProRodinki, Skinive and SkinVision. Applications’ ways of work and user experience flows for self-service screening scenario were described and the practical experiment measuring the sensitivity and specificity using dataset validated by histological researches was made.

Every application is unique and differs from each other by its principles of work, algorithms, user experience and design, and of course AI model and the set of input data that is analyzed by neural networks. Current research and practical experiment

were made with focus on images processing and the app risk assessment for each of the image, other details and mole prescriptions information were set neutral. This leads to a conclusion that there is a lack of methodology for testing and analysis of different AI-based applications and services. Having such methodology, the comparison analyses results can be more objective and transparent.

It is important to compare and test different AI-based apps specialized on skin cancer risk assessment to measure their quality and efficiency, to monitor and manage the progress of AI technologies and, as a result, to use it as help for doctors and health organizations.

## References

1. Ukharov AO, Shlivko IL, Klemenova IA., Garanina OE, Uskova KA, Mironycheva AM, Stepanova YL. Skin cancer risk self-assessment using AI as a mass screening tool. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2023; 38:101223. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2023.101223>
2. Fontanillas P, Alipanahi B, Furlotte NA, Johnson M, Wilson CY. 23andMe Research Team, Pitts SJ, Gentleman R, Auton A. Disease risk scores for skin cancers. *Nat Commun*. 2021 Jan8;12:160. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20246-5>
3. Gupta AK, Bharadwaj M, Mehrotra R. Skin cancer concerns in people of color: risk factors and prevention. *Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP*. 2016 Dec;117 (12):5257–5264. <https://doi.org/10.22034/APJCP.2016.17.12.5257>
4. Zhu S, Sun C, Zhang L, Du X, Tan X, Peng S. Incidence trends and survival prediction of malignant skin cancer: a SEER-based study. *International Journal of General Medicine*. 2022;15:2945–2956. <https://doi.org/10.2147/IJGM.S340620>
5. Davis LE, Shalin SC, Tackett AJ. Current state of melanoma diagnosis and treatment. *Cancer biology & therapy*. 2019;20(11):1366–1379. <https://doi.org/10.1080/15384047.2019.1640032>
6. Apalla Z, Nashan D, Weller RB, Castellsagué X. Skin cancer: epidemiology, disease burden, pathophysiology, diagnosis, and therapeutic approaches. *Dermatol Ther (Heidelb)*. 2017;7(Suppl 1):5–19. <https://doi.org/10.1007/s13555-016-0165-y>
7. Blum A, Bosch S, Haenssle HA, Fink C, Hofmann-Wellenhof R, Zalaudek I, Kittler H, Tschandl P. Künstliche Intelligenz und Smartphone-Programm- Applikationen (Apps). *Hautarzt*. 2020;71:691–698. <https://doi.org/10.1007/s00105-020-04658-4>
8. Chao E, Meenan CK, Ferris LK. Smartphone-Based Applications for Skin Monitoring and Melanoma Detection. *Dermatol Clinics*. 2017 Oct;35(4):551–557. <https://doi.org/10.1016/j.det.2017.06.014>
9. Freeman K, Dinnes J, Chuchu N, Takwoingi Y, Bayliss SE, Matin RN, Jain A, Walter FM, Williams HC, Deeks JJ. Algorithm based smartphone apps to assess risk of skin cancer in adults: systematic review of diagnostic accuracy studies. *BMJ*. 2020;368:m127. <https://doi.org/10.1136/bmj.m127>
10. Ngoo A, Finnane A, McMeniman E, Tan JM, Janda M, Soyer HP. Efficacy of smartphone applications in high-risk pigmented lesions. *Australasian Journal of Dermatology*. 2018;59(3):e175-e182. <https://doi.org/10.1111/ajd.12599>
11. Flaten HK, St Claire C, Schlager E, Dunnick CA, Dellavalle RP. Growth of mobile applications in dermatology-2017 update. *Dermatology online journal*. 2018; 24(2):1–4. <https://doi.org/10.5070/D3242038180>
12. Gates B. *The Age of AI has begun*. March 21, 2023. URL: <https://www.gatesnotes.com/The-Age-of-AI-Has-Begun> (22.02.2023)
13. Matin RN, Dinnes J. AI-based smartphone apps for risk assessment of skin cancer need more evaluation and better regulation. *British Journal of Cancer*. 2021; 124(11):1749–1750. <https://doi.org/10.1038/s41416-021-01302-3>
14. Ćirković A. Evaluation of Four Artificial Intelligence-Assisted Self-Diagnosis Apps on Three Diagnoses: Two-Year Follow-Up Study. *Journal of Medical Internet Research*. 2020;22(12):e18097. <https://doi.org/10.2196/18097>
15. Stehman SV. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote sensing of Environment*. 1997;62(1):77–89. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00083-7)

## About the authors

**Stepan S. Korotkiy**, Graduate student, Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-4613-970X; E-mail: skorotkiy@gmail.com

**Olga A. Saltykova**, Ph.D. of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3880-6662; E-mail: saltykova-oa@rudn.ru

**Andrey O. Ukharov**, Ph.D. of Technical Sciences, Researcher, Moscow State Technical University n.a. Bauman, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3490-3657; E-mail: oukharov@gmail.com

**Irena L. Shlivko**, D. Sci. (Med.), Assoc. Prof., Privolzhsky Research Medical University; Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7253-7091; E-mail: irshlivko@gmail.com

**Irina A. Klemenova**, D. Sci. (Med.), Prof., Privolzhsky Research Medical University; Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1042-8425; E-mail: iklemenova@mail.ru

**Oxana E. Garanina**, Ph.D. of Medical Sciences, Assoc. Prof., Privolzhsky Research Medical University; Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7326-7553; E-mail: oksanachekalkina@yandex.ru

**Kseniia A. Uskova**, Assistant, Privolzhsky Research Medical University; Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1000-9848; E-mail: k\_balyasova@bk.ru

**Anna M. Myronycheva**, Assistant, Privolzhsky Research Medical University; Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7535-3025; E-mail: mironychevann@gmail.com

**Yana L. Stepanova**, Assistant, Privolzhsky Research Medical University; Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-9228-7770; E-mail: stepanova.ya09@yandex.ru

### Сведения об авторах

**Короткий Степан Сергеевич**, аспирант департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0009-0004-4613-970X; E-mail: skorotkiy@gmail.com

**Салтыкова Ольга Александровна**, кандидат физико-математических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3880-6662; E-mail: saltykova-oa@rudn.ru

**Ухаров Андрей Олегович**, кандидат технических наук, научный сотрудник, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-3490-3657; E-mail: oukharov@gmail.com

**Шливко Ирена Леонидовна**, доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой кожных и венерических болезней, Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7253-7091; E-mail: irshlivko@gmail.com

**Клеменова Ирина Александровна**, доктор медицинских наук, профессор кафедры кожных и венерических болезней, Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1042-8425; E-mail: iklemenova@mail.ru

**Гаранина Оксана Евгеньевна**, кандидат медицинских наук, доцент кафедры кожных и венерических болезней, Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7326-7553; E-mail: oksanachekalkina@yandex.ru

**Ускова Ксения Александровна**, ассистент кафедры кожных и венерических болезней, Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-1000-9848; E-mail: k\_balyasova@bk.ru

**Миронычева Анна Михайловна**, ассистент кафедры кожных и венерических болезней, Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7535-3025; E-mail: mironychevann@gmail.com

**Степанова Яна Леонидовна**, ассистент кафедры кожных и венерических болезней, Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: 0009-0004-9228-7770; E-mail: stepanova.ya09@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278  
EDN: UQGPAI  
УДК 620.186

Научная статья / Research article

## Пути снижения неметаллических включений в покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой

А.В. Завитков , А.С. Локтев , А.Б. Люхтер , К.А. Фролов 

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ВлГУ,  
Владимир, Российская Федерация  
✉ vip.zavitkov@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 16 апреля 2023 г.  
Доработана: 17 июля 2023 г.  
Принята к публикации: 25 июля 2023 г.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

### Ключевые слова:

лазерная наплавка, неметаллические включения, КР-спектроскопия, газовая защита, мощность излучения

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Для цитирования

Завитков А.В., Локтев А.С., Люхтер А.Б., Фролов К.А. Пути снижения неметаллических включений в покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 271–278. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278>

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований, основанных на анализе наплавленных покрытий и методов обработки, направленных на снижение количества неметаллических включений в процессе лазерной порошковой наплавки. Основная цель экспериментов заключалась в определении эффективности различных методов снижения неметаллических включений в наплавленных покрытиях. Источниками подобных дефектов зачастую являются окислы и шлак на обрабатываемой поверхности, а также гранулы порошкового материала, применяемого для нанесения износостойких покрытий. В качестве материала подложки использовалась коррозионностойкая жаропрочная сталь марки 08X18H10T (аналог AISI 321), из которого были изготовлены образцы с размерами 100x100x8 мм. Наплавка была выполнена с использованием металлического порошкового материала ПР — 08X17H8C6Г (аналог электрода ЦН-6Л) с фракционным составом 63–125 мкм, имеющего сферическую форму частиц и обладающего хорошей текучестью. Опытная лазерная наплавка производилась на лазерном роботизированном комплексе на базе иттербиевого волоконного лазера. Оценка неметаллических включений выполнялась путем металлографического анализа на травленных поперечных шлифах полученных наплавленных покрытий, а также методом КР-спектроскопии. Установлена качественная зависимость содержания дефектов, таких как газовые поры, в слое наплавленного покрытия от кристаллизации ванны расплава, формируемой при лазерной порошковой наплавке.



## Methods for reducing non-metallic inclusions in coatings applied by laser surfacing

Alexey V. Zavitkov , Alexander S. Loktev , Alexander B. Lyukhter , Kirill A. Frolov 

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, *Vladimir, Russian Federation*

✉ vip.zavitkov@mail.ru

### Article history

Received: April 16, 2023

Revised: July 17, 2023

Accepted: July 25, 2023

### Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUN-2020-0015, state task of the VLSU).

### Keywords:

laser cladding, non-metallic inclusion, Raman spectroscopy, gas protection, laser power

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### For citation

Zavitkov AV, Loktev AS, Lyukhter AB, Frolov KA. Methods for reducing non-metallic inclusions in coatings applied by laser surfacing. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):271–278. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278>

### Введение

Лазерная порошковая наплавка является перспективным методом восстановления изношенных поверхностей, а также модификации поверхности путем придания недорогим маркам стали необходимых свойств на поверхности с повышенными характеристиками: износостойкости, жаростойкости, антифрикционными и коррозионной стойкости [1–3]. При лазерной наплавке на поверхность, содержащую неорганические соединения (оксиды, нитриды, загрязнения) может значительно понизиться качество наносимых покрытий [4]. Это связано с интенсивным перемешиванием в ванне расплава материала наплавки и материала подложки. За счет этого процесса неметаллические включения с поверхности подложки могут оказаться

внутри наплавляемого покрытия. Неметаллическими включениями являются окислы, шлак, в том числе газовые поры. Обозначенные дефекты образуются в наплавленном материале, также в результате наследования структуры гранул порошка.

Для обеспечения наплавки исключаящих неметаллические включения необходимо формирование условий, способствующих повышению длительности фазы ванны расплава, а также ее текучести [5–7]. В процессе застывания и кристаллизации ванны расплава неметаллические включения концентрируются по границе зерен, что приводит к снижению механических свойств получаемого материала. Эффективным методом выявления неметаллических включений является КР-спектроскопия [8–10].

Проблемы наличия неметаллических включений в слое наплавки были решены путем принятия комплекса мер, а именно: предварительная подготовка поверхности под наплавку (устранение поверхностного слоя окислов); увеличение погонной мощности лазерного излучения [11; 12]; улучшение эффективности газовой защиты.

### 1. Методы исследования

Для проведения экспериментальных работ по наплавке в работе был использован лазерный роботизированный комплекс наплавки на базе иттербиевого волоконного лазера, в состав которого входят 6-осевой промышленный робот манипулятор FANUC M710iC/50, одноколбовый порошковый питатель GTV PF 2/1 LC, экспериментальная оптическая лазерная головка с модулем подачи порошка с четырех сторон. Использование сопла, обеспечивающего заданный поток порошкового материала в зону наплавки, лазер IPG LC-3-K, было рассмотрено в [12].

В качестве наплавочного материала использовали металлический порошок эрозийно-стойких сплавов марки ПР-08Х17Н8С6Г (аналог электродов ЦН-6Л) с размерами частиц 63–125 мкм по ТУ 14-22-250-2013, предназначенный для высокопроизводительной и качественной наплавки уплотнительных поверхностей деталей арматуры энергетических установок [12; 13]. Данный порошковый материал имеет сферическую форму частиц и обладает хорошей текучестью. Химический состав порошка представлен в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Элементный состав порошкового материала ПР-08Х17Н8С6Г / Elemental composition of powder 08Kh17N8S6G**

Fe	C	Cr	Co	Ni	Si	Mn	S	O <sub>2</sub>	P	N <sub>2</sub>
base	0,096	17,7	0,08	7,97	5,55	1,92	0,014	0,02	0,03	0,09

В качестве подложки использовали сталь марки 08Х18Н10Т (АISI 321). Наплавка выполнялась с предварительным подогревом подложки 350 °С в среде защитного газа аргона (Ar ВЧ 99,998 %).

Для оценки эффективности используемых методов уменьшения содержания неметаллических включений внутри наплавляемых покрытий были изготовлены лабораторные образцы

лазерной наплавки с размерами подложки 100×100×8 мм. Наплавка наносилась в один слой. На основе ранее проведенных исследований [12; 14] был выбран оптимальный технологический режим: мощность лазерного излучения — 2800 Вт, движение лазерной головки — 6 мм/сек, расход порошкового материала — 15 г/мин, шаг перекрытия наплавляемых дорожек — 2 мм, расход защитного газа 25 л/мин, диаметр пятна лазерного излучения — 5 мм, расход транспортирующего газа — 8 л/мин, расход защитного газа — 20 л/мин.

Перед проведением экспериментальных работ поверхность образцов подвергалась механической обработке с целью удаления поверхностного слоя, содержащего неорганические включения.

Эффективность влияния указанных методов уменьшения количества неметаллических включений внутри, а также на поверхности наплавляемых покрытий была оценена металлографическим анализом на травленых поперечных шлифах полученных образцов, а также методом КР-спектроскопии. Травление осуществлялось смесью азотной (HNO<sub>3</sub>), соляной (HCl), серной (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) кислот, дистиллированной воды (H<sub>2</sub>O) и хлорного железа (FeCl).

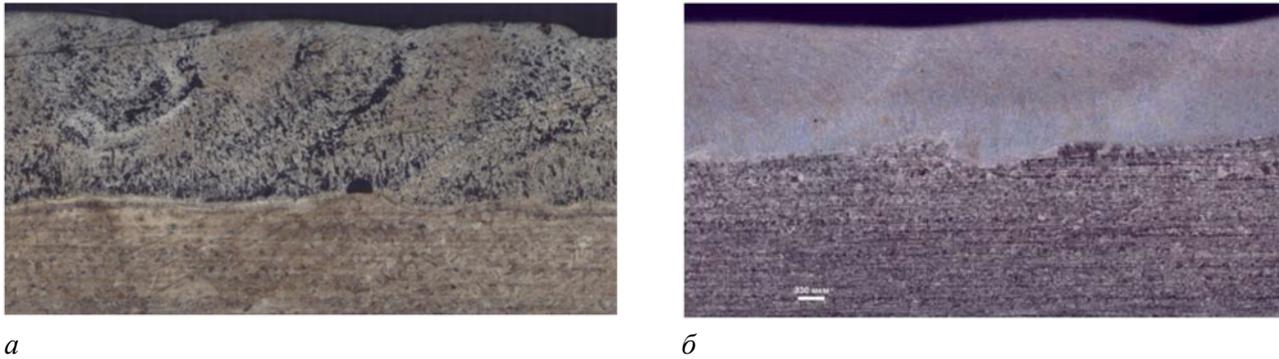
### 2. Результаты

При нанесении порошкового материала на предварительно подготовленную поверхность, а с использованием разработанной сопловой насадки в процессе лазерной наплавки удается снизить неметаллические включения в структуре наплавленного слоя.

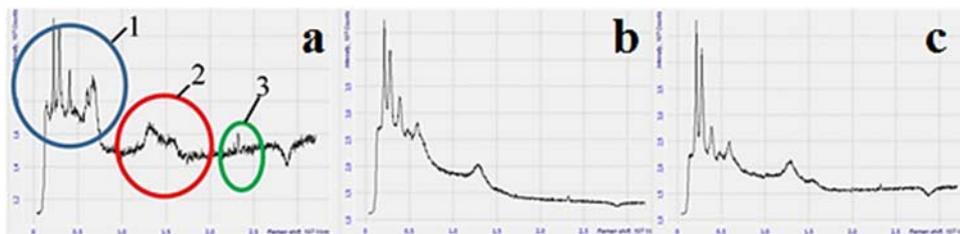
Поперечные сечения наплавленного слоя, состоящего из единичных валиков, нанесенных с перекрытием, на предварительно подготовленную и не подготовленную поверхность представлены на рис. 1.

Для проведения КР-спектроскопии были подготовлены следующие образцы:

- области разрушения наплавленного образца, выполненные без предварительной обработки поверхности подложки (см. рис. 1, а);
- поверхности излома образца, выполненные с предварительной обработкой поверхности перед наплавкой (см. рис. 1, б);
- поверхности гранул наплавляемого порошкового материала (см. рис. 5).



**Рис. 1.** Микрошлифы образцов наплавки:  
*a* — на неподготовленную поверхность, с сопловой насадкой;  
*б* — на механически обработанную поверхность, используя сопловую насадку  
**Figure 1.** Micro-plates of surfacing samples:  
*a* — on an unprepared surface, with a nozzle nozzle;  
*б* — on a mechanically treated surface, using a nozzle nozzle



**Рис. 2.** КР-спектр поверхности разрушения образца для трех (*a*, *b*, *c*) случайных мест без предварительной обработки исследуемой поверхности:  
*1* — область с пиками, характерная для оксидов, нитридов;  
*2* — область с пиками, характерная для углерода; *3* — область с артефактами [15–18]  
**Figure 2.** Raman spectrum of the fracture surface of the sample for three (*a*, *b*, *c*) random places without pretreatment of the surface under study:  
*1* — area with peaks characteristic of oxides, nitrides;  
*2* — area with peaks characteristic of carbon; *3* — area with artifacts [15–18]

Образование неметаллических включений характерно по границе зерна, по ним наблюдается разрушение структуры материала на поверхности излома, по которому произошло разрушение образца. Можно сделать предположение о попадании азота/кислорода в объем порошкового материала в процессе наплавки, либо это результат разрушения поверхностного слоя загрязнений на поверхности образца, наплавка на который осуществлялась без предварительной подготовки (механической очистки поверхности). В процессе наплавки, образования ванны расплава и кристаллизации материала неметаллические включения вытесняются на границу зерна, что мы наблюдаем на КР-спектре, представленном на рис. 2.

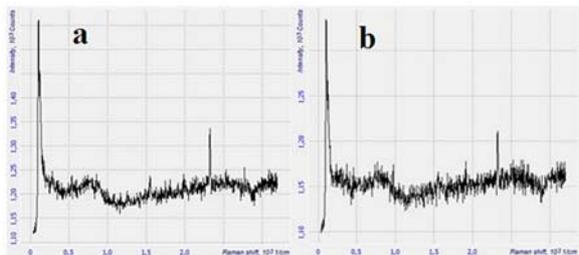
Далее были проанализированы результаты КР-спектров поверхности разрушения образца

без предварительной обработки (рис. 2). На передней части спектра (область 1), присутствуют выраженные пики оксидов, нитридов компонентов наплавочного материала, в средней части спектра, наблюдается два пика, характерных для углерода, в области 3 обозначены артефакты, вызванные засветкой люминесцентной лампы освещения.

На рис. 3 представлен КР-спектр поверхности, полученной после шлифовки плоскости разрушения образца наплавки, изготовленного с предварительно зачищенной поверхностью.

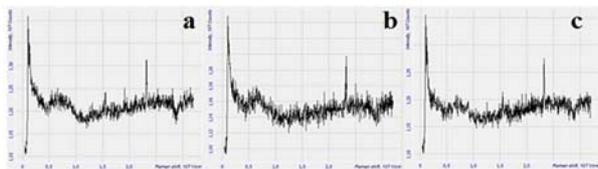
КР-спектр поверхности, полученной в результате шлифовки плоскости разрыва образца, говорит о значительном снижении концентрации неметаллических примесей, вероятно, они присутствуют в виде мелких включений в объеме зерна. Регистрируемые пики имеют нес-

колько большую интенсивность пиков, полученных с поверхности гранул порошкового материала. Вероятно, увеличение интенсивности регистрируемых пиков вызвано появлением дополнительных примесей, например, с необработанной поверхности подложки, либо кластеризацией неметаллических частиц в более крупные объекты, дающие более интенсивный отклик соответствующих линий на КР-спектре.



**Рис. 3.** КР-спектр области разрушения (поверхность зерна) на: *a, b* — исследуемом образце с предварительно зачищенной поверхностью перед наплавкой  
**Figure 3.** Raman spectrum of the fracture region (grain surface) on: *a, b* — the test sample from the pre-cleaned surface before surfacing

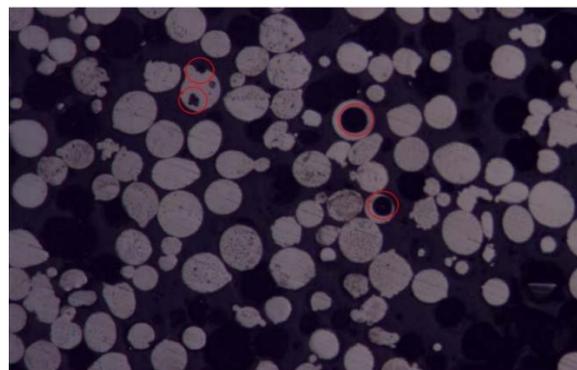
Предположение о возможности образования окислов за счет наличия таковых в наплавляемом порошке отчасти может быть верно. На КР-спектрах, полученных с поверхности гранул используемого порошкового материала (см рис. 4), наблюдается наличие неметаллических материалов, наблюдаемых в аналогично представленных на рис. 2 областях. Наблюдаемые линии могут быть вызваны наличием как неметаллических примесей на поверхности, так и равномерно растворенных во всем объеме исследуемых гранул.



**Рис. 4.** КР-спектр поверхности гранул наплавляемого порошка для трех случайных мест: *a* — измерение № 1; *b* — измерение № 2; *c* — измерение № 3 /  
**Figure 4.** Raman spectrum of the surface of the granules of the deposited powder for three random places: *a* — measurement No. 1; *b* — measurement No. 2; *c* — measurement No. 3

Анализ КР-спектров поверхностей гранул и поверхностей зерен разрушенного образца схожи, что свидетельствует о наследовании химического и фазового составов наплавленного материала от порошкового материала, что отмечалось в работе [8].

Структура используемого порошкового материала была исследована путем подготовки торцевого сечения гранул порошкового материала, залитых эпоксидной смолой (рис. 5). В исследуемых гранулах выявлено наличие пор (отмечены красным на рис. 5), что описано в литературе как распространенное явление, вызванное методом синтеза порошкового материала. Данные поры могут приводить к образованию пор в объеме наплавленного валика при условии недостаточного теплового вклада в процесс наплавки (когда полное расплавление гранул затруднено, наблюдается частичное оплавление) либо низкой скорости перемешивания оплавленного материала в ванне расплава, опять же ввиду недостаточного объема либо приложенной энергии.

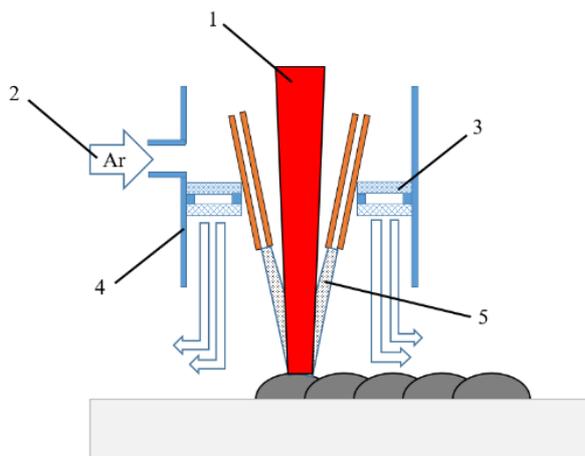


**Рис. 5.** Шлиф поверхности гранул наплавляемого порошкового материала  
**Figure 5.** The cut of the surface of the granules of the deposited powder material

В результате сравнения КР-спектров сечения наплавленной дорожки на поверхность без предварительной подготовки выявлено значительное снижение интенсивности пиков комбинационного рассеяния характерных для оксидных и нитридных включений. Проведенное исследование носило качественный характер, показавший, что использование предварительной подготовкой поверхности (устранение поверхностного слоя окислов), позволило снизить

наличие неметаллических включений в ванне расплава, повысить эффективность взаимного перемешивания материала подложки и порошкового материала. Неметаллические включения, регистрируемые на КР-спектрах, аналогичны включениям, зарегистрированным с поверхности гранул используемого порошкового материала.

Для устранения пор и газовых карманов в структуре гранул порошкового материала (см. рис. 4) необходимо повысить энергоемкость процесса, чтобы снизить поверхностное натяжение компонентов ванны расплава, повысить общую ликвидность, что позволит эффективно устранить газовые пузырьки из расплавленных гранул порошкового материала в процессе конвективных движений в ванне расплава [9]. Энергоемкость процесса увеличилась за счет повышения мощности лазерного излучения, снижения потерь тепла во внешнюю среду из области наплавки и создания теплового газового экрана путем использования разработанной конструкции сопловой насадки (рис. 6).



**Рис. 6.** Сопловая насадка: 1 — лазерное излучение; 2 — защитный газ (Ar); 3 — газовая линза; 4 — сопловая насадка; 5 — порошковый материал

**Figure 6.** Nozzle nozzle: 1 — laser radiation; 2 — protective gas (Ar); 3 — gas lens; 4 — nozzle nozzle; 5 — powder material

При использовании сопловой насадки в области воздействия лазерного излучения отраженное излучение разогревает стенки насадки, а при прохождении газового потока, содержащего гранулы порошкового материала, через область, ограниченную ее стенками, требуется

меньше энергии для их оплавления. Газовая линза, в состав которой входит металлическая сетка с размером ячейки 40 мкм, обеспечивает направленный поток защитного газа, в объеме которого распространяется порошковый материал, оплаваемый лазерным излучением, и ложится на поверхность образца. Направленная газовая струя приводит к более эффективному движению ванны расплава [19; 20].

Совокупность этих действий позволяет эффективно удалять неметаллические включения и поры, в том числе содержащиеся внутри гранул порошкового материала из объема ванны расплава на поверхности наплавляемого валика.

## Заключение

Совокупность приведенных в работе способов позволяет эффективно удалять неметаллические включения и поры, в том числе содержащиеся внутри гранул порошкового материала из объема ванны расплава на поверхность наплавляемого валика, путем повышения погонной мощности лазерного излучения. С учетом применения комплекса мер были получены образцы лазерной порошковой наплавки. Количество неметаллических включений в образцах было ниже, чем на гранулах используемого порошкового материала.

Для получения покрытий с минимальным количеством неметаллических включений необходима не только качественная подготовка покрытия, но и обеспечение большей длительности существования ванны расплава, что было сделано в работе путем повышения мощности лазерного излучения, а также использования специальной сопловой насадки.

## Список литературы / References

1. Santo L. Laser cladding of metals: a review. *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2008;2(5):327–336. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2008.021345>
2. Vilar R. Laser cladding. *Journal of laser applications*. 1999;11(2):64–79. <https://doi.org/10.2351/1.521888>
3. Pogodaev LI, Ezhov YE. Improving the durability of operating devices of technical fleet vessels using wear-resistant facings. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2014;43(6):528–532. <https://doi.org/10.3103/S1052618814060077>

4. Byun JS, Shim J-H, Cho YW, Lee DN. Show more Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn steel. *Acta Materialia*. 2003;51(6):1593–1606. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00560-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00560-8)
5. Picasso M, Rappaz M. Laser-powder-material interactions in the laser cladding process. *Journal de Physique IV*. 1994;4(C4):C4-27–C4-33. <https://doi.org/10.1051/jp4:1994404>
6. Goodarzi DM, Pekkarinen J, Salminen A. Effect of process parameters in laser cladding on substrate melted areas and the substrate melted shape. *Journal of Laser Applications*. 2015;27(S2):S29201. <https://doi.org/10.2351/1.4906376>
7. Gots AN, Gusev DS, Lukhter AB, Zavitkov AV. Selection of rational modes of laser powder cladding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Sevastopol: IOP Publishing Ltd. 2020; 971(2):022093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022093>
8. Sklyar MO, Turichin GA, Klimova-Korsmik OG, Zotov OG, Topalov IK. Microstructure of 316L stainless steel components produced by direct laser deposition. *Steel in Translation*. 2016;46(12):883–887. <https://doi.org/10.3103/S096709121612010X>
9. Marin E, Zanocco M, Boschetto F, Santini M, Zhu Z, Adachi T, Ohgitani E, et al. Silicon nitride laser cladding: A feasible technique to improve the biological response of zirconia. *Materials & Design*. 2020;191(3):108649. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108649>
10. Xin B, Yu Y, Zhou J, Zhou J, Wang L, Ren Sh, Li Z. Effect of silver vanadate on the lubricating properties of NiCrAlY laser cladding coating at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*. 2016; 307:136–145. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.063>
11. Aucott L, Dong H, Mirihanage W, et al. Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals. *Nature communications*. 2018;9(1):5414. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07900-9>
12. Lyukhter AB, Frolov KA, Kochuev DA, Zavitkov AV, Gusev DS. Distortion of AISI 1020 steel substrate in the process of laser cladding of E-300 powder material. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 2077, 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021) 20-22 September 2021, St. Petersburg, Russia*. 2021; 2077(1):012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2077/1/012004>
13. Гоц А.Н., Люхтер А.Б., Гусев Д.С., Завитков А.В. Выбор режимов лазерной наплавки порошка ПР-08Х17Н8С6Г // Черные металлы. 2020. № 11. С. 46–51. <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.07>
14. Gots AN, Lyukhter AB, Gusev DS, Zavitkov AV. Selection of modes for laser cladding of PR-08Kh17N8S6G powder. *Chernye metally [Ferrous Metals journal]*. 2020;11:46–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.07>
15. Mansour H, Letifi E, Bargougui R, De Almeida-Didry S, Negulescu B, Autret C, Gadri A, Ammar S. Structural, optical, magnetic and electrical properties of hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles synthesized by two methods: polyol and precipitation. *Applied Physics A*. 2017;123(12):787. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1408-1>
16. Ma J, Teo J, Mei L, Zheng W. Porous platelike hematite mesocrystals: synthesis, catalytic and gas-sensing applications. *Journal of Materials Chemistry*. 2012;22(23):11694–11700. <https://doi.org/10.1039/C2JM30216K>
17. Boumaza S, Boudjema A, Omeiri S, Bouarab R, Bouguelia A, Trari M. Physical and photo electrochemical characterizations of hematite  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Application to photocatalytic oxygen evolution. *Solar Energy*. 2010;84(4):715–721.
18. Frolov KA, Voznesenskaya A, Gusev DS, Kochuev D, Lyukhter A, Zavitkov AV. Monitoring of alloying components burnout during laser powder cladding by laser-induced breakdown spectroscopy. *2022 International Conference Laser Optics (ICLO)*. Saint Petersburg, Russian Federation. 2022:01-01. <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839864>
19. Lyukhter AB, Palkin P, Zavitkov AV, Kononov DM, Kireev AV. Dependence of the structure and characteristics of a Russian alternative for AISI 304 stainless steel powder on the parameters of their laser cladding on substrates from low-carbon and structural steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing*. 2019;681(1):012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012028>
20. Gotz AN, Gusev DS, Guskov VF, Zavitkov AV, Lukhter A B, Prokoshev VG, Rummyantsev IV. The effect of laser cladding modes on the geometrical parameters and adhesion strength of the deposited layer on a steel substrate 08Kh18N10T of corrosion-resistant powder 08Kh17N8S6G. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896(1):012129. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012129>

#### Сведения об авторах

**Завитков Алексей Викторович**, ассистент кафедры тепловых двигателей и энергетических установок, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4323-5398; E-mail: vip.zavitkov@mail.ru

**Локтев Александр Сергеевич**, аспирант кафедры технологий машиностроения, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0009-0004-5978-2219; E-mail: sloktev15@gmail.com

**Люхтер Александр Борисович**, кандидат технических наук, директор научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru

**Фролов Кирилл Андреевич**, аспирант кафедры функционального анализа и его приложения института прикладной математики, физики и информатики, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com

#### **About the authors**

**Alexey V. Zavitkov**, Assistant lecturer of the Department of Thermal Engines and Power Plants, Institute of Mechanical Engineering and Automobile Transport, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4323-5398; E-mail: vip.zavitkov@mail.ru

**Alexander S. Loktev**, Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Institute of Mechanical Engineering and Automobile Transport, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-5978-2219; E-mail: sloktev15@gmail.com

**Alexander B. Lyukhter**, Candidate of Technical Sciences, Director of the Research and Educational Center for Introduction of Laser Technologies, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru

**Kirill A. Frolov**, Postgraduate student of the Department of Functional Analysis and Its Applications, Institute of Applied Mathematics, Physics and Informatics, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-279-287  
EDN: QVOEYE  
UDC 621.91.01

Research article / Научная статья

## Application of experimental data based on Taguchi approach to optimize machining parameters of Al6061-T6 to reduce cutting forces and moments

Kazem Reza Kashyzadeh , Siamak Ghorbani ✉, Marianna Yu. Malkova

RUDN University, Moscow, Russian Federation  
✉ gorbani-s@rudn.ru

### Article history

Received: April 7, 2023  
Revised: June 19, 2023  
Accepted: June 25, 2023

### Keywords:

aluminum alloy, milling,  
machining parameter, Taguchi  
method, cutting force, vibration

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### For citation

Reza Kashyzadeh K, Ghorbani S, Malkova MYu. Application of experimental data based on Taguchi approach to optimize machining parameters of Al6061-T6 to reduce cutting forces and moments. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):279–287. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-279-287>

**Abstract.** The requirements for the quality and accuracy of manufactured products are constantly increasing. Reliability, durability, and accuracy of machine operation largely depend on the quality of surface treatment. Study on the cutting process, in particular milling, makes it possible to find out the operating conditions of the cutting tool, determine the acting cutting forces, torques, vibrations and temperatures on it. Along with studying the influence of various parameters on the milling process, it is necessary to pay special attention to establishing the nature and degree of influence of the cutting condition (cutting speed, depth of cut and feed rate). In this paper milling operation of Al6061-T6 was performed in a dry condition. The effects of cutting parameters on cutting forces and moments in different directions and around various axes were studied. By applying Taguchi technique and performing experiments, it was shown that cutting force was significantly affected by feed rate followed by rotational speed and cutting depth. Cutting moment is mainly influenced by feed rate, cutting depth, and rotational speed. Moreover, feed rate is the most effective factor on minimizing cutting forces and moments. Finally, the optimum cutting parameters was revealed to get a minimum cutting forces and moments.



## Использование метода Тагучи при обработке Al6061-T6 с целью уменьшения сил и моментов резания

К. Реза Каши Заде , С. Горбани , М.Ю. Малькова 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ gorbani-s@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 7 апреля 2023 г.

Доработана: 19 июня 2023 г.

Принята к публикации: 25 июня 2023 г.

### Ключевые слова:

алюминиевый сплав, фрезерование, режим обработки, метод Тагучи, сила резания, вибрация

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Для цитирования

Reza Kashyzadeh K., Ghorbani S., Malkova M.Yu. Application of experimental data based on Taguchi approach to optimize machining parameters of Al6061-T6 to reduce cutting forces and moments // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 279–287. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-279-287>

**Аннотация.** Требования к качеству и точности выпускаемой продукции постоянно повышаются. От качества обработки поверхностей во многом зависят надежность, долговечность и точность работы машин. Изучение процесса резания, в частности фрезерования, позволяет выявить режимы работы режущего инструмента, определить действующие на него силы резания, моменты, вибрации и температуры. Наряду с изучением влияния различных параметров на процесс фрезерования необходимо особое внимание уделить установлению характера и степени влияния режима резания (скорости резания, глубины резания и скорости подачи). Выполнена фрезеровка заготовки из Al6061-T6 в сухом состоянии. Исследовано влияние параметров резания на силы и моменты резания в различных направлениях и вокруг различных осей. Применяя метод Тагучи и проводя эксперименты, было показано, что на силу резания существенно влияет подача, скорость резания и глубина резания. На момент резания в основном влияют подача, глубина резания и скорость резания. Кроме того, подача является наиболее эффективным фактором для минимизации сил и моментов резания. Наконец, были выявлены оптимальные параметры резания для получения минимальных сил и моментов резания.

## Introduction

One of the most important criteria in the machining of aluminum and its alloys is the cutting force, which determines the energy costs and consumed power. This may lead to deflection-based surface errors and regenerative chatter, negatively affecting the quality and productivity [1]. Moreover, different parameters such as vibrations, cutting tool geometry and properties, workpiece materials and properties, cutting parameters and cutting conditions influence the cutting force and surface roughness [2]. Hence, achieving high-quality performance and improved production costs in milling operation is possible by controlling and optimising cutting parameters and defining the rate of their impact on the cutting force. Pham et al. have used Taguchi technique and ANOVA analysis to investigate the

effects of cutting parameters on the cutting force in high-speed milling of Al6061 aluminum alloy [3]. Elssawi et al. have optimised cutting parameters to reach the minimum cutting forces and the best level of the surface toughness in milling of Al6061 using Taguchi method [4]. Some scholars have stated that increasing the cutting speed decreases the shear stress in the primary shear zone and in the flow zone at the secondary shear region which is related to the cutting temperature [5; 6]. Furthermore, the machining forces are reduced regardless of the strength of the aluminum alloy [7; 8]. As it is related to the high-speed cutting, the machining forces increase with an excessive increase in the deformation rates [9–11]. Moreover, an increase in the depth of cut and/or feed rate leads to an increase in the primary and secondary areas of shear planes, which prevents material shearing and increases the machining forces [7; 8;

12]. Campatelli and Scippa proposed a new model to predict the milling cutting force by studying the effects of cutting speed and feed per tooth on the cutting coefficients of the aluminum alloy 6082-T4 [13]. Zatarain et al. employed Continuous Spindle Speed Variation (CSSV) technique to model milling processes, optimize parameters of the speed variation, reduce the vibration level in milling, and improve the surface quality [14]. Tsai et al. investigated the influence of the tool diameter and the feed per tooth on the milling cutting force and cutting coefficients of aluminum 6060-T6 [15]. Stepan et al. predicted cutting force coefficients in milling as a nonlinear function of cutting speeds, chip loads, and material imperfections [16]. Irene et al. have experimentally studied the effects of the cutting speed, feed rate, and cutting depth on the cutting forces and on the surface quality of the aluminum alloys as a machined part [17].

As can be seen from the literature review, an accurate and effective cutting force and its model are needed to monitor, plan, and control the milling operations of aluminum alloys. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth study on the influence of cutting parameters on the cutting forces and moments during the milling of Al6061-T6, which is one of the most widely used 6xxx series aluminum alloys. To this end, experiments were planned utilising Design of Experiment technique, using the signal-to-noise ratio as the result of Taguchi sensitivity analysis, and the influence of each parameter on the cutting forces and moments was statically determined.

## 1. Experimental works

### 1.1. Material and specimen

The studied material was 6xxx series aluminum alloy sheets with dimensions of 150 mm × 90 mm × 10 mm, prepared by a casting process. A quantitative test was performed to extract the percentage of constituent elements of the raw material Al 6061 (Table 1). Next, the conventional T6 heat treatment of Al 6061 alloy [18] was used for the preparation of the specimens, as shown in Figure 1.

### 1.2. Milling operation

In this study, the specimen (150 mm × 90 mm × 10 mm) was connected to a dynamometer using two M8 screws to measure the cutting forces and moments during machining. To start the milling pro-

Table 1

Element	wt%
Al	97.7
Si	0.57
Fe	0.36
Cu	0.21
Mn	0.02
Mg	0.98
Ni	0
Ti	0
Cr	0.16

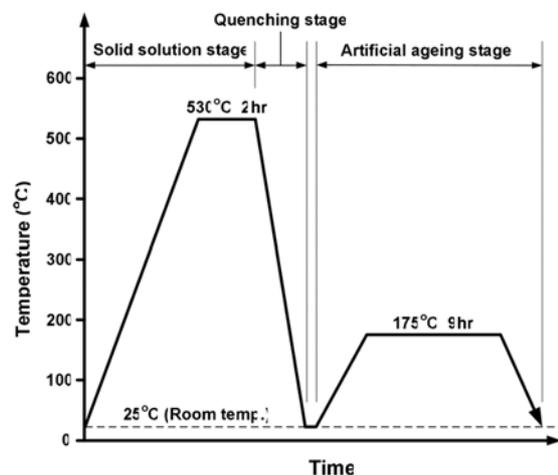


Figure 1. The conventional T6 heat treatment of Al 6061 alloy [18]

Table 2

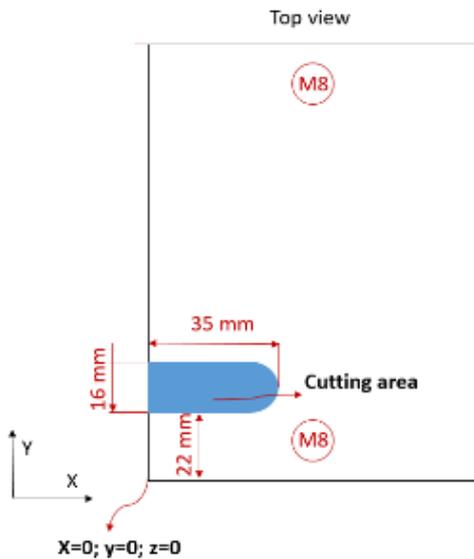
Cutting Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
Cutting depth, mm	1	1.5	2
Rotational speed, rpm	1000	1500	2000
Feed rate, m/min	200	300	400

cess, rotational speed, feed rate, cutting depth are set at 1000 rpm, 200 m/min and 1 mm, respectively. Moreover, the start point of milling is  $x = 0$ ,  $y = 22$ ,  $z = -1$  and the end point is related to  $x = 35$ . Therefore, the path of the tool movement was in the  $x$  direction. The size and location of the cutting area are shown in Figure 2. In addition, lubrication was not used in the milling process. In this study, a KISTLER dynamometer made in Switzerland (type 9257B) was used to measure the time history of the cutting forces in different directions ( $F_x$ ,  $F_y$ , and  $F_z$ ). The sensors and measurements were calibrated so

that the uncertainty in loading was 0.053, 0.05, and 0.056 for the  $x$ -,  $y$ -, and  $z$ -directions, respectively. All steps of advice calibration were performed at an ambient temperature of 24°C and a relative humidity of 36%. In addition, a new specific cutting tool (KORLOY Inc., Korea) was used for each milling process (Figure 3, *a*) to avoid tool wear effects on the experimental results. Moreover, the tool holder was the cylinder with non-uniform cross-section. The cross-sectional diameter of the end of the tool holder tied to the machine is 16 mm, and the other side of the tool holder to which the tool tied is about 13.3, and the height of the cylinder is 120 mm (Figure 3, *b*). Finally, it should be noted that 2/3 of the height of the tool holder is closed inside the machine and 1/3 is free.

### 1.3. Design of Experiments by Taguchi method

To study the effect of the process parameters on the cutting forces, the milling process and force measurement for different proposed modes were performed using Taguchi Approach (TA) [19–23]. To this end, the cutting depth ( $a_p$ ), the feed rate per tooth ( $f_z$ ), and the rotational speed ( $V_c$ ) were considered as variables (Table 2). In this regard, the settings of the milling process parameters were considered in accordance with Table 3. The distance between the two cutting areas was 6 mm and the cuttings were performed in two rows. In other words, to cut the second row, it is necessary for the tool to move in the  $X$ -direction by a negative value of 35 mm (Figure 4).



*a*



*b*

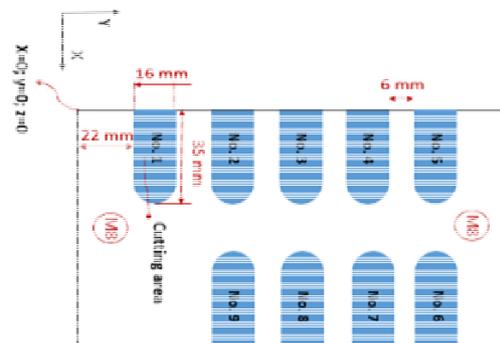
**Figure 2.** Size and location of the cutting area: *a* — in the schematic form; *b* — in real terms



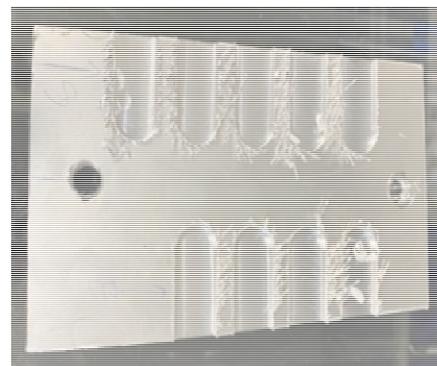
*a*

*b*

**Figure 3.** *a* — Special cutting tools, *b* — tool holder as equipment used in this experiment



*a*



*b*

**Figure 4.** *a* — a general schematic of all tests; *b* — in real terms

Table 3

Variables and their levels used as input data in the TA

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cutting depth, mm	1	1	1	1.5	1.5	1.5	2	2	2
Rotational speed, rpm	1000	1500	2000	1000	1500	2000	1000	1500	2000
Feed rate, m/min	200	300	400	300	400	200	400	200	300

## 2. Results and discussion

To record the output data, including the forces and moments in different directions, the sampling rate and recording time in the dynamometer software were set at 200 Hz and 10 seconds, respectively. The results of the first test mode of  $F_z$  are shown in Figure 5. Statistical information, including values of maximum, minimum, mean, and standard deviation, were calculated from the recorded data and are reported as force and moment factors in Tables 4 and 5, respectively. It is clear from Table 4 that the maximum and minimum values of the force history in the  $X$ - and  $Y$ -directions are approximately the same for all tests, and only  $F_z$  changed dramatically in the various tests. Therefore, in the next steps, the focus will be on the  $Z$ -force component. Similarly, based on the data in Table 5, the moment around the  $X$ - and  $Y$ -axes will be considered in future studies. Moreover, increasing the cutting speed resulted in a decrease in the cutting force and moment this pheno-

menon can be explained by the fact that as the cutting speed increases, the workpiece material (in our case, Al6061-T6) is affected by thermal softening owing to the increased temperature and reduced flow stress in the primary shear zone. Based on the results obtained from the experiments, in Taguchi sensitivity analysis, three variables, force in the  $z$ -direction and moments around the  $x$ - and  $y$ -axes, are considered as the output. It is also assumed that the best-case scenario reduces the number of output variables. Because of the reduction in cutting forces, less energy consumption is required. The main effect plots for the signal-to-noise ratios were used to study the cutting force ( $F_z$ ) and moments ( $M_x$ ,  $M_y$ ) with respect to the process parameters (Figure 6). The minimum value of the cutting force in the  $z$ -direction ( $F_z$ ) corresponded to the cutting parameters at levels  $A_2B_1C_3$ . This is  $A_1B_2C_3$  for  $M_x$  and  $A_1B_3C_3$  for  $M_y$ . Where A represents the cutting depth, B is the rotational speed, and C is the feed speed.

Table 4

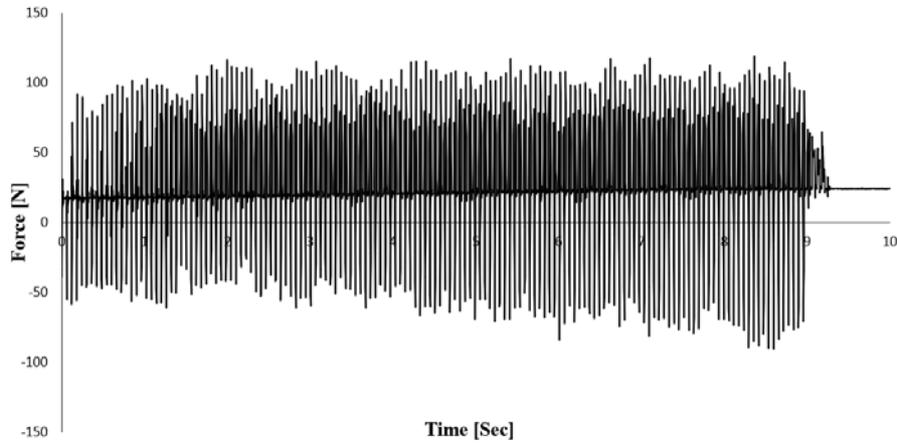
Statistical information of force recorded data in different test modes

Test No.	Force in the different directions, N											
	X-direction				Y-direction				Z-direction			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
1	-100	100	16.37	50.43	-100	100	22.74	56.27	-90.54	119.09	25.46	35.62
2	-100	100	14.09	42.94	-100	100	16.10	48.79	-72.41	94.30	11.42	23.37
3	-100	100	11.06	39.35	-100	100	11.18	42.74	-49.80	128.70	12.78	29.99
4	-100	100	15.09	46.39	-100	100	16.79	45.86	-162.3	154.76	3.48	40.60
5	-100	100	11.95	39.57	-94.41	100	12.51	37.38	-128.6	97.97	5.44	26.37
6	-100	95.52	-21.31	48.03	-100	100	-18.41	52.86	-59.86	66.64	21.49	18.27
7	-100	100	-9.6	40.73	-100	100	-11.30	44.40	-170.5	150.64	2.99	30.97
8	-100	100	-24.78	53.53	-100	100	-24.75	60.40	-66.86	74.93	13.59	20.80
9	-100	97.86	-17.74	45.37	-100	100	-16.69	51.33	-59.23	92.38	17.57	19.78

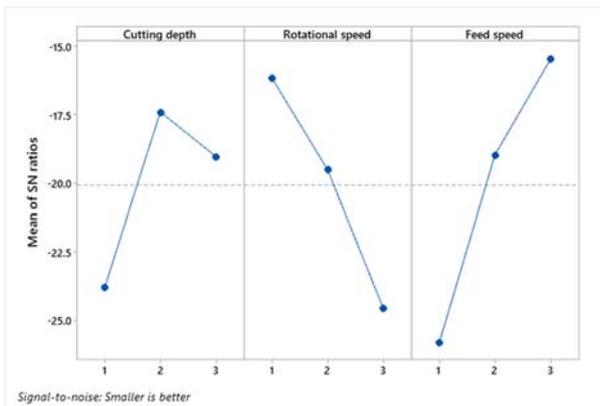
Table 5

Statistical information of moment recorded data in different test modes

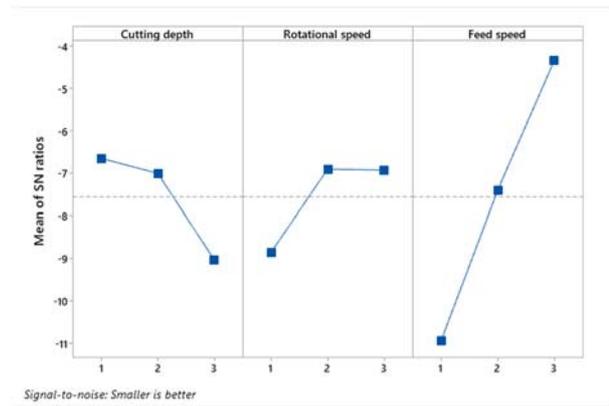
Test No.	Moment around different axes, N.m											
	X-axis				Y-axis				Z-axis			
	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
1	-3.87	24.00	3.88	7.12	-11.30	6.57	-1.54	4.20	-7.74	2.28	-1.5	2.39
2	-5.27	19.43	1.84	5.36	-12.04	5.72	-1.19	3.60	-7.73	2.89	-0.54	1.74
3	-6.68	17.67	1.39	4.21	-12.21	6.59	-0.72	3.05	-7.73	4.09	-0.26	1.45
4	-12.78	24.71	2.57	6.64	-16.10	9.85	-1.62	5.42	-7.75	5.42	-0.19	2.16
5	-10.39	21.20	1.51	4.99	-15.81	8.71	-1.37	4.46	-7.74	6.30	0.01	2.01
6	-17.80	5.13	-2.89	5.58	-4.80	12.33	2.01	4.00	-7.73	3.11	-1.23	2.02
7	-30.00	10.13	-2.13	7.08	-9.83	16.28	1.55	5.15	-7.74	4.29	-0.44	1.80
8	-22.15	7.57	-3.90	7.17	-6.84	15.18	2.77	5.72	-7.77	4.54	-0.77	2.26
9	-20.92	9.16	-2.72	5.83	-6.76	14.64	1.97	4.90	-7.74	6.26	-0.24	2.18



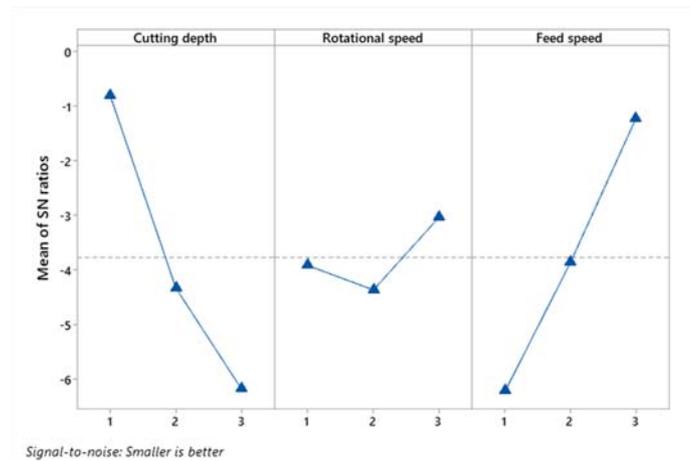
**Figure 5.** The measurements for the first test mode of cutting force in the Z-direction



**a**



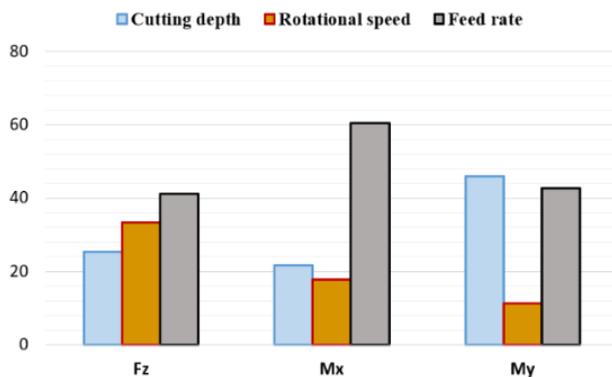
**b**



**c**

**Figure 6.** Means of SN ratios of different outputs under the impact of milling process parameters, including:  
*a* — mean of cutting force in the z-direction, *b* — mean of cutting moment around the x-axis;  
*c* — mean of cutting moment around the y-axis

A higher feed rate reduces the standard deviation of the thickness errors, leading to a more homogeneous thickness distribution owing to the dynamic behaviour (creating lower vibration amplitudes) of the milling process [17]. Furthermore, the results of Taguchi approach show that the effective parameters for the cutting force ( $F_z$ ) are the feed rate (41.17 %), rotational speed (33.29 %), and cutting depth (25.44 %). In addition, for the  $M_x$  analysis, they are the feed rate (60.39 %), cutting depth (21.78 %), and rotational speed (17.83 %). It can be concluded that the feed rate is the most effective factor for the cutting force in the  $z$ -direction and cutting moment around the  $x$ -axis. However, the cutting depth had the greatest effect on the cutting moment around the  $y$ -axis (45.96 %). Nonetheless, in this analysis, the impact value of the feed rate is equal to 42.66 %, which is not significantly different from the impact value of the cutting depth (owing to the possibility of error in the calculations for the reasons described above, this difference is negligible). Hence, the feed rate is the most effective factor for minimising the cutting forces and moments compared to other milling process parameters. The results of Taguchi approach are presented in Figure 7.



**Figure 7.** The Results of Taguchi approach for studying the effect of milling process parameters on the cutting forces and moments

## Conclusion

In this study, the influence of machining parameters on the cutting forces and moments in the milling of aluminum alloy Al6061T6 was investigated. Taguchi method was used to design the experiment and establish the relationship between cutting parameters and cutting forces and moments. The results of the experiments showed that the maximum and minimum values of  $F_x$ ,  $F_y$ , and  $M_z$  did

not change, and only the  $F_z$ ,  $M_x$ , and  $M_y$  have changed dramatically in the various tests. It is concluded that the effective parameters of the cutting force ( $F_z$ ) are the feed rate (41.17 %), rotational speed (33.29 %), and cutting depth (25.44 %). In addition, for the  $M_x$  analysis, they are feed rate (60.39 %), cutting depth (21.78 %), and rotational speed (17.83 %). The cutting moment along the  $y$ -axis was mainly affected by the cutting depth (45.96 %). The most dominant factor affecting the cutting force and moment is the feed rate. It is also found that the minimum value of the cutting force in  $z$ -direction ( $F_z$ ) corresponded to the cutting parameters at levels  $A_2B_1C_3$ . This is  $A_1B_2C_3$  for  $M_x$  and  $A_1B_3C_3$  for  $M_y$ . As revealed in this study, the machining parameters can be controlled to minimise the cutting force in milling Al6061-T6. This can help to choose the appropriate cutting parameters, and more importantly, by optimising them, it would be possible to design desired cutting tools and estimate the required power.

## References

1. Wan M, Ma YC, Feng J, Zhang WH. Study of static and dynamic ploughing mechanisms by establishing generalized model with static milling forces. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;114:120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.05.010>
2. Kuttalamadom M, Hamzehlouia S, Mears L. Effect of machining feed on surface roughness in cutting 6061 aluminum. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*. 2010;3(1):108–119. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0218>
3. Pham TH, Mac TB, Tong VC, Banh TL, Nguyen DT. A study on the cutting force and chip shrinkage coefficient in high-speed milling of A6061 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;98(1–4):177–188. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1063-x>
4. Elssawi Y, Guofu D, Shengfeng Q. Prediction of cutting force and surface roughness using Taguchi technique for aluminum alloy AA6061. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2016;14(3):151–160. <https://doi.org/10.1080/14484846.2015.1093220>
5. Dudzik K. Mechanical properties of 5083, 5059 and 7020 aluminium alloys and their joints welded by MIG. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011;18(3):73–77.
6. Zaghbani I, Songmene V. A force-temperature model including a constitutive law for dry high speed milling of aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(5):2532–2544. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.050>
7. Fuh KH, Chang HY. An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response

surface design. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997;72(1):42–47. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00127-1)

8. Manna A, Bhattacharyya B. A study on different tooling systems during machining of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003; 123(3):476–482. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00127-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00127-9)

9. Yousefi R, Ichida Y. A study on ultra-high-speed cutting of aluminium alloy: formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface. *Precis. Eng. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*. 2000;24(4):371–376. [https://doi.org/10.1016/s0141-6359\(00\)00048-9](https://doi.org/10.1016/s0141-6359(00)00048-9)

10. Nur R, Kurniawan D, Noordin MY, Izman S. Optimizing power consumption for sustainable dry turning of treated aluminum alloy. *Procedia Manufacturing*. 2015;2:558–562. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.096>

11. Larbi S, Djebali S, Bilek A. Study of high speed machining by using split Hopkinson pressure bar. *Procedia Engineering*. 2015;114:314–321. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.074>

12. Ng CK, Melkote SN, Rahman M, Senthil KA. Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(9):929–936. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.08.004>

13. Campatelli G, Scippa A. Prediction of Milling Cutting Force Coefficients for Aluminum 6082-T4. *Procedia CIRP*. 2012.1:563–568. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.100>

14. Zatarain M, Bediaga I, Munoa J, Lizarralde R. Stability of milling processes with continuous spindle speed variation: Analysis in the frequency and time domains, and experimental correlation. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 2008;57:379–384. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.067>

15. Tsai MY, Chang SY, Hung JP, Wang CC. Investigation of milling cutting forces and cutting coefficient for aluminum 6060-T6. *Computers & Electrical Engineering*. 2015;51:320–330. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.09.016>

16. Stepan G, Dombovari Z, Munoa J. Identification of cutting force characteristics based on chatter experiments. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 2011; 60(1):113–116. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.100>

17. Irene DS, Asuncion R, Antonio JG. Effects of machining parameters on the quality in machining of aluminium alloys thin plates. *Metals*. 2019;9:927. <https://doi.org/10.3390/met9090927>

18. Ko DH, Ko DC, Lim HJ, Kim BM. Application of QFA coupled with CFD analysis to predict the hardness of T6 heat treated Al6061 cylinder. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2013;27(9):2839–2844. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0732-4>

19. Maleki E, Unal O, Kashyzadeh KR. Efficiency analysis of shot peening parameters on variations of hardness, grain size and residual stress via Taguchi approach. *Metals and Materials International*. 2019;25(6):1436–1447. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00290-7>

20. Farrahi GH, Kashyzadeh KR, Minaei M, Sharifpour A, Riazi S. Analysis of resistance spot welding process parameters effect on the weld quality of three-steel sheets used in automotive industry: Experimental and finite element simulation. *International Journal of Engineering*. 2020;33(1):148–157. <https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.01A.17>

21. Kashyzadeh KR, Ghorbani S, Forouzanmehr M. Effects of drying temperature and aggregate shape on the concrete compressive strength: Experiment and Data mining techniques. *International Journal of Engineering*. 2020;33(9):1780–1791. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.09c.12>

22. Ghorbani S, Ghorbani S, Kashyzadeh KR. Taguchi Approach and Response Surface Analysis for Design of a High-performance Single-walled Carbon Nanotube Bundle Interconnects in a Full Adder. *International Journal of Engineering*. 2020;33(8):1598–1607. <https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.08B.18>

23. Reza Kashyzadeh K, Mousavi Bafrouyi SMS, Khorsandijou SM. Effects of road roughness, aerodynamics, and weather conditions on automotive wheel force. *International Journal of Engineering*. 2021;34(2): 536–546. <https://doi.org/10.5829/IJE.2021.34.02B.27>

#### About the authors

**Kazem Reza Kashyzadeh**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Transport, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0552-9950; E-mail: reza-kashyzade-ka@rudn.ru

**Siamak Ghorbani**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0251-3144; E-mail: gorbani-s@rudn.ru

**Marianna Yu. Malkova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6939-1658; E-mail: malkova-myu@rudn.ru

### **Сведения об авторах**

**Реза Каши Заде Казем**, кандидат технических наук, профессор департамента транспорта, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0552-9950; E-mail: reza-kashi-zade-ka@rudn.ru

**Горбани Сиамак**, кандидат технических наук, доцент базовой кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0251-3144; E-mail: gorbani-s@rudn.ru

**Малькова Марианна Юрьевна**, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроительных технологий, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6939-1658; E-mail: malkova-myu@rudn.ru

