

ISSN 2713-3192  
DOI 10.15622/ia.2021.20.6  
<http://ia.spcras.ru>

ТОМ 20 № 6

# ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

# INFORMATICS AND AUTOMATION



Санкт-Петербург  
2021



# INFORMATICS AND AUTOMATION

Volume 20 № 6, 2021

Scientific and educational journal primarily specialized in computer science, automation, robotics, applied mathematics, interdisciplinary research

Founded in 2002

---

## Founder and Publisher

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)

---

## Editor-in-Chief

**R. M. Yusupov**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

---

## Editorial Council

<b>A. A. Ashimov</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
<b>N. P. Veselkin</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
<b>I. A. Kalyaev</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Taganrog, Russia
<b>Yu. A. Merkur'yev</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia
<b>A. I. Rudskoi</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
<b>V. Sgurev</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
<b>B. Ya. Sovetov</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of RAE, St. Petersburg, Russia
<b>V. A. Soyfer</b>	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Samara, Russia

---

## Editorial Board

<b>O. Yu. Gusikhin</b>	Ph. D., Dearborn, USA
<b>V. Delic</b>	Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia
<b>A. Dolgui</b>	Prof., Dr. Sci., St. Etienne, France
<b>M. N. Favorskaya</b>	Prof., Dr. Sci., Krasnoyarsk, Russia
<b>M. Zelezny</b>	Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech Republic
<b>H. Kaya</b>	Assoc. Prof., Ph.D., Utrecht, Netherlands
<b>A. A. Karpov</b>	Assoc. Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>S. V. Kuleshov</b>	Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>A. D. Khomonenko</b>	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>D. A. Ivanov</b>	Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany
<b>K. P. Markov</b>	Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan
<b>R. V. Meshcheryakov</b>	Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia
<b>N. A. Moldovian</b>	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>V. Yu. Osipov</b>	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>V. K. Pshikhopov</b>	Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia
<b>A. L. Ronzhin</b>	Prof., Dr. Sci., Deputy Editor-in-Chief, St. Petersburg, Russia
<b>H. Samani</b>	Assoc. Prof., Ph.D., Plymouth, UK
<b>V. Skormin</b>	Prof., Ph.D., Binghamton, USA
<b>A. V. Smirnov</b>	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
<b>B. V. Sokolov</b>	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia

---

**Editor:** A.S. Lopotova

**Interpreter:** E.N. Mesheryakova

**Art editor:** N.A. Dormidontova

---

## Editorial office address

14-th line V.O., 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,

e-mail: ia@spcras.ru, web: <http://ia.spcras.ru>

**The journal is indexed in Scopus**

The journal is published under the scientific-methodological supervision of Department for Nanotechnology and Information Technology of the Russian Academy of Sciences  
© St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2021

# ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Том 20 № 6, 2021

Научный, научно-образовательный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации, робототехники, прикладной математики и междисциплинарных исследований.

Журнал основан в 2002 году

## Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»  
(СПб ФИЦ РАН)

## Главный редактор

Р. М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

## Редакционный совет

А. А. Ашимов	академик Национальной академии наук Республики Казахстан, д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан
Н. П. Веселкин	академик РАН, д-р мед. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
И. А. Каляев	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
Ю. А. Меркурьев	академик Латвийской академии наук, д-р, проф., Рига, Латвия
А. И. Рудской	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В. Сгурев	академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария
Б. Я. Советов	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В. А. Сойфер	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

## Редакционная коллегия

О. Ю. Гусихин	д-р наук, Диаборн, США
В. Делич	д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия
А. Б. Долгий	д-р наук, проф. Сент-Этьен, Франция
М. Железны	д-р наук, доцент, Пльзень, Чешская республика
Д. А. Иванов	д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия
Х. Кайя	д-р наук, доцент, Утрехт, Нидерланды
А. А. Карпов	д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербург, РФ
С. В. Кулешов	д-р техн. наук, Санкт-Петербург, РФ
К. П. Марков	д-р наук, доцент, Аизу, Япония
Р. В. Мещеряков	д-р техн. наук, проф., Москва, РФ
Н. А. Молдовян	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В.Ю. Осипов	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В. Х. Пшихолов	д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
А. Л. Ронжин	д-р техн. наук, проф., зам. главного редактора, Санкт-Петербург, РФ
Х. Самани	д-р наук, доцент, Плимут, Соединённое Королевство
В. А. Скормин	д-р наук, проф., Бингемптон, США
А. В. Смирнов	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Б. В. Соколов	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Л. В. Уткин	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
М. Н. Фаворская	д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ
А. Д. Хомоненко	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Л. Б. Шереметов	д-р техн. наук, Мехико, Мексика

Выпускающий редактор: А.С. Лопотова

Переводчик: Е.Н. Мещерякова

Художественный редактор: Н.А. Дормидонтова

## Адрес редакции

199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39

e-mail: ia@spcras.ru, сайт: <http://ia.spcras.ru>

## Журнал индексируется в международной базе данных Scopus

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 2021  
Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания - журнала «ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания журнала «ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ»

## CONTENTS

### Robotics, Automation and Control Systems

A. Nakayama, D. Ruelas, J. Savage, E. Bribiesca TELEOPERATED SERVICE ROBOT WITH AN IMMERSIVE MIXED REALITY INTERFACE	1187
R. Galin, A. Shiroky, E. Magid, R. Meshcheryakov, M. Mamchenko EFFECTIVE FUNCTIONING OF A MIXED HETEROGENEOUS TEAM IN A COLLABORATIVE ROBOTIC SYSTEM	1224
E. Shmalko, Yu. Rumyantsev, R. Baynazarov, K. Yamshanov IDENTIFICATION OF NEURAL NETWORK MODEL OF ROBOT TO SOLVE THE OPTIMAL CONTROL PROBLEM	1254
A. Erashov, K. Kamynin, K. Krestovnikov, A. Saveliev METHOD FOR ESTIMATING TIME OF WIRELESS TRANSFER OF ENERGY RESOURCES BETWEEN TWO ROBOTS	1279
A. Balabanov, A. Bezuglaya, E. Shushlyapin UNDERWATER ROBOT MANIPULATOR CONTROL	1307
D. Trung, N. Tuan, N. Bang, T. Tuyen SYNTHESIS OF LINE OF SIGHT ANGLE COORDINATE FILTER ON THE BASIS OF INTERACTIVE MULTI-MODEL EVALUATION ALGORITHM	1333
E. Basan, Eu. Abramov, A. Basyuk, N. Sushkin SPOOFING ATTACK DETECTION METHOD FOR UAV NAVIGATION SYSTEM	1368
N. Sevostyanova, I. Lebedev, V. Lebedeva, I. Vatamaniuk AN INNOVATIVE APPROACH TO AUTOMATED PHOTO-ACTIVATION OF CROP ACREAGE USING UAVS TO STIMULATE CROP GROWTH	1395
A. Mozohin METHODOLOGY FOR ENSURING A COMFORTABLE MICROCLIMATE STATE IN A SMART HOME USING AN ENSEMBLE OF FUZZY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS	1418

## СОДЕРЖАНИЕ

### Робототехника, автоматизация и системы управления

- А. Накаяма, Д. Руэлас, Х. Саваж, Э. Брибеска  
ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЙ СЕРВИСНЫЙ РОБОТ С  
ИММЕРСИВНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ СМЕШАННОЙ РЕАЛЬНОСТИ 1187
- Р.Р. Галин, А.А. Широкий, Е.А. Магид, Р.В. Мещеряков, М.В. Мамченко  
ЭФФЕКТИВНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СМЕШАННОЙ  
НЕОДНОРОДНОЙ КОМАНДЫ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ 1224  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
- Е.Ю. Шмалко, Ю.А. Румянцев, Р.Р. Байназаров, К.Л. Ямшанов  
ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ РОБОТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ 1254  
ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
- А.А. Ерашов, К.В. Камынин, К.Д. Крестовников, А.И. Савельев  
МЕТОД ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ 1279  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ ДВУМЯ РОБОТАМИ
- А.Н. Балабанов, А.Е. Безуглая, Е.А. Шушляпин  
УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ ПОДВОДНОГО РОБОТА 1307
- Д.Т. Чунг, Н.Н. Туан, Н.В. Банг, Т.В. Туйен  
СИНТЕЗ ФИЛЬТРА КООРДИНАТ УГЛА ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ НА 1333  
ОСНОВЕ ИНТЕРАКТИВНОГО МНОГОМОДЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА  
ОЦЕНКИ
- Е.С. Басан, Е.С. Абрамов, А.Г. Басюк, Н.А. Сушкин  
МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК НА СИСТЕМУ НАВИГАЦИИ БПЛА 1368
- Н.Н. Севостьянова, И.В. Лебедев, В.В. Лебедева, И.В. Ватаманюк  
ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ 1395  
ФОТОАКТИВАЦИИ ПОСЕВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ПОСРЕДСТВОМ БПЛА С  
ЦЕЛЬЮ СТИМУЛЯЦИИ РОСТА КУЛЬТУР
- А.Е. Мозохин  
МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМФОРТНОГО СОСТОЯНИЯ 1418  
МИКРОКЛИМАТА УМНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ  
НЕЧЕТКИХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

A. NAKAYAMA , D. RUELAS , J. SAVAGE , E. BRIBIESCA  
**TELEOPERATED SERVICE ROBOT WITH AN IMMERSIVE  
MIXED REALITY INTERFACE**

---

*Nakayama A., Ruelas D., Savage J., Bribiesca E.* **Teleoperated Service Robot with an Immersive Mixed Reality Interface.**

**Abstract.** Teleoperated service robots can perform more complex and precise tasks as they combine robot skills and human expertise. Communication between the operator and the robot is essential for remote operation and strongly affects system efficiency. Immersive interfaces are being used to enhance teleoperation experience. However, latency or time delay can impair the performance of the robot operation. Since remote visualization involves transmitting a large amount of video data, the challenge is to decrease communication instability. Then, an efficient teleoperation system must have a suitable operation interface capable of visualizing the remote environment, controlling the robot, and having a fast response time. This work presents the development of a service robot teleoperation system with an immersive mixed reality operation interface where the operator can visualize the real remote environment or a virtual 3D environment representing it. The virtual environment aims to reduce the latency on communication by reducing the amount of information sent over the network and improve user experience. The robot can perform navigation and simple tasks autonomously or change to the teleoperated mode for more complex tasks. The system was developed using ROS, UNITY 3D, and sockets to be exported with ease to different platforms. The experiments suggest that having an immersive operation interface provides improved usability for the operator. The latency appears to improve when using the virtual environment. The user experience seems to benefit from the use of mixed reality techniques; this may lead to the broader use of teleoperated service robot systems.

**Keywords:** teleoperated robot, service robot, immersive operation interface, mixed reality interface, virtual reality environment

---

**1. Introduction.** Service robots can perform more complex and precise tasks by harnessing human experience through teleoperation. Teleoperation systems are intended to provide technical means to perform the desired task in a remote environment [1]. In an efficient teleoperation system, the operator must be ensured that the desired task is adequately performed in the remote environment. To this end, teleoperation systems must overcome a series of barriers such as distance, and time delay, among others. Furthermore, the relationship between the operator and the remote environment strongly affects the system efficiency. This means that system performance can be vastly improved by allowing the operator to understand the interaction with the remote environment intuitively and easily.

The feeling of presence refers to the operator's sensation of being present in the remote environment [2]. Ideally, the system should make the operator feel the remote environment as if it were the real world. There is a belief that presence or embodiment is correlated with task performance positively [3] so, by improving the feeling of presence, task performance is also improved.

In addition to improved performance, the feeling of presence also gives the operator the ability to perform the task in a more natural way, similar to real-world actions. This can reduce the need for the operator to train extensively to successfully operate the robot.

A typical method of providing the feeling of presence is by displaying video from the robot's camera [4, 5]. Recently, immersive interfaces have been used to induce the feeling of being inside the robot [6] and improve the teleoperation experience [7]. The feeling of presence is the result of immersion [8]. Therefore, immersive interfaces are often accompanied by Head-Mounted Displays (HMD) consisting of a display combined with a head-tracking system to improve immersion and control.

Communication between the operator and the robot is also essential for effective remote operation. Virtual reality (VR) has proven to be an excellent option for displaying information to the operator. VR enhances communication between a system and its users by displaying and visualizing complex data efficiently. VR systems are being used for robotic teleoperation tasks due to their ability to allow users to intuitively interact with 3D environments and concede fluid interaction in the physical world [9]. Gradecki defined VR as a "technology that allows a user to view a virtual environment from any point and angle, and interact with objects that make up that environment" [10].

By enhancing the teleoperation interface with virtual environments, the operator can experience better robot control, allow non-expert users to control the robot, and leverages the experts' experience in challenging domains [11]. However, the integration of robots with VR systems can become a challenging task, as several considerations must be taken into account. For instance, the lack of standard interfaces that connect ROS (Robot Operating System) with virtual reality platforms that use HMD [12], or VR sickness, which are the ailments such as headaches, dizziness, and nausea caused by misuse of the VR environments [13].

Latency or time delay is a key factor in teleoperation systems. The time delay between input and visual feedback response greatly afflicts the communication between distributed master and slave systems over a network [14]. This delay can vary from a few milliseconds to several hundred milliseconds, depending on different factors such as distance or communication infrastructure. Early experiments to test the effect of time delays on teleoperation have shown that latency impairs the performance of the robot operation [15]. More recent studies show that in systems with latency over 1 second, the operator often tries to compensate for the delay with a "move and wait" strategy [16] that makes the robot's operation suboptimal. Much effort has been made to reduce latency, such as algorithms for data compression and optimization.

For example, Bouzakaria and collaborators [17] are trying to reduce network latency and have obtained response times below 240 milliseconds on a local network.

The Internet is becoming the most common communication medium in teleoperation [18] since it offers several advantages such as ease of use, broad accessibility, low cost, and relative reliability. But despite these benefits, this communication technology has its drawbacks, such as latency, loss of data packets, and others [19]. As remote visualization involves transmitting a large amount of video data over the network, the challenge is to decrease communication instability, such as latency, which is one of the main problems in teleoperation [4].

In summary, an efficient teleoperation system must have a suitable operating interface that is not only capable of viewing the remote environment, controlling the robot, and providing a feeling of presence but also has a fast response time.

This work presents the development of a service robot teleoperation system with an immersive mixed reality operation interface where the operator can visualize the robot's actual environment or a virtual 3D environment representing it. Mixed Reality is the concept (not any particular technology) of combining real and virtual worlds [20]. It involves the merging of real and virtual worlds somewhere along the "virtuality continuum" which connects completely real to completely virtual environments [21].

The aim of adding a virtual environment is to reduce communication latency by reducing the amount of information sent over the network and improving the user experience. However, adding the virtual reality environment brought the need to ensure that the task was being performed correctly, so visualization of the real environment through the robot's cameras was also required. To overcome this, a mechanism was added to switch between real and virtual visualization modes.

The design and development of this teleoperation system required considering diverse aspects such as having a user-friendly operation interface, dealing with communication media (such as transmission, protocols, and time-delay problems), creating a custom virtual environment faithful to the real environment, selecting proper virtual reality devices, implementing emerging features, and testing with human operators.

The system should allow everyday users to perform navigation tasks without extensive training. Therefore, the robot should be controlled remotely through an operation interface, and the operator should be able to move or navigate the robot with freedom in the remote environment. In addition, the



operator should be able to view the remote environment through the robot's stereoscopic cameras with a 3D effect on the HMD.

To deal with latency issues and prevent the operator from having an unpleasant user experience, it is possible to change the visualization mode from real 3D to virtual 3D and continue to operate the robot in the VR environment with no difference from the real one. One of the goals of this dual visualization is that the user was able to navigate successfully in the remote environment by real or virtual mode indistinctly without further issues such as dizziness, collisions with objects, or damaging any component of the robot or the remote environment.

Another crucial point to consider was the lighting conditions. The robot had to be able to operate normally even when changing the lighting conditions. This means that if the remote environment goes dark, the real visualization would be inappropriate to continue operating as the operator would be unable to see the environment. When changing to the VR mode, this change in lighting shouldn't affect the visualization. However, the operator must still be able to perceive the new lighting conditions to preserve the feeling of presence and enhance the user experience.

The developed system contains an operation interface with two visualization modes: a real stereo video from the robot's cameras and a virtual 3D environment mapping the real environment. The interface is displayed in an HMD to put the operator in a virtual space that contains both visualization modes. This HMD also controls the movements of the robot's head by following the operator's head movements. For navigation and other features, a joystick is used. The service robot can perform navigation and simple tasks autonomously or it can switch to teleoperated mode when navigating in difficult places or when performing complex tasks.

The tests suggest that the immersive mixed reality interface for teleoperation provided improved usability for operators. On the one hand, the VR mode provided an environment to experiment naturally with the robot and remote location. On the other hand, visualization in real 3D was a great aid when users needed to ensure that the task was performed similarly in real and virtual environments. Communication latency appears to have improved when using virtual mode, as there is no need to visualize real video. Additionally, the virtual mode provided a certain level of realism, which is a key feature for training operators. Teleoperation was presumably successful in both environments without collisions or major problems. Switching between visualization modes appears to provide more control to the operator and generally improves the experience.

**2. Related Work.** Mixed reality techniques are a convenient instrument for teleoperation systems. In recent years the advances in VR technology have prompted the use of HMD's and 3D visualization. A variety of applications taking advantage of such technologies have been proposed to enhance teleoperation. For instance, Lipton and collaborators [22] developed Baxter's Homunculus, a telerobotic system that uses commercial VR technology and a Baxter robot. Baxter is a versatile manufacturing robot designed to perform repetitive assembly line tasks. This system consists of a VR Control Room presented to the user through an Oculus Rift (a commercial HMD). The Control Room has the shape of a robot head with a window showing the robot environment pretending the user was a minuscule human inside the robot controlling it. Unlike the proposed system, Baxter's Homunculus does not display the images from the robot cameras directly to the user's eyes but on a pair of 2D surfaces representing virtual windows within the Control Room which may cause a loss of situational awareness. Lipton and collaborators dealt with latency by adding the Control Room to hide the delay issues and leave the 3D interpretation task to the user's brain. The Homunculus system requires three computers to operate, one for the Oculus, one for the robot, and one for transmitting and receiving a video stream from the HD cameras. The proposed system requires only one non-specialized computer to control the robot and a mobile device or the Oculus Rift (with an additional computer) to visualize the user interface. Our system uses a joystick to operate the robot intuitively as it was inspired by video games, in contrast with the Homunculus, which requires the users to complete a tutorial before using the system.

Immersive teleoperation interfaces present a system that maps movements from the user to the teleoperated robot to perform them and visualize what the robot perceives through its cameras. Teleyes [23] is a system based on stereoscopic vision and head movement tracking to control Unmanned Vehicle Systems (UVS). Its goal is to reduce the visual distortion in remote environments by synchronizing human and machine vision. Teleyes provides the operator with the sensation of being on board the UVS by displaying the images from two cameras attached to the UVS on an HMD. The use of stereo cameras provides a better perception of the environment depth. The system synchronizes user head movement with the controlled UVS. Teleyes uses a VR Headset with an iPhone 6 plus as HMD. An inertia measurement unit (IMU) sensor was attached to the HMD for head tracking, and two cameras were installed on the UVS to capture the stereo video to transmit it to the user. Teleyes and the proposed system share the approach of enhancing the teleoperation experience by matching the stereo cameras and head movement with user visualization and control of the device. However, Teleyes was designed to work

in a local wi-fi network which reduces communication issues. Teleoperation from a distance or over the Internet is not under the scope of Teleyes. Its experiments aimed to prove the ability to interpret the remote environment from the sense of sight. Teleyes only provides real-video visualization of the remote location it does not use any virtual environment.

Virtual Environment for Tele-Operation (VETO) [24] is an immersive user interface for the teleoperation of a small robot. VETO was designed to operate in a fully observable environment scanned beforehand and automatically generates walls and rooms in a virtual environment for the user to explore them. It improves the raw visual feedback with additional information in the form of text and haptic feedback. The CrossSock Networking API was developed to work with VETO using the C++ programming language. CrossSock is a cross-platform, lightweight, and header-only high-level solution for developing client-server architectures. It uses Transmission Control Protocol (TCP) and User Datagram Protocol (UDP) sockets for data transmission. VETO uses a Leap Motion Controller mounted on the HMD to generate a mesh representation of the user's hand position and finger movements in the virtual view. Its architecture uses the Unreal Engine 4 game engine for its user interface presented on an Oculus Rift VR headset. Similar to the Homunculus project, the VETO interface does not show video from the robot stereoscopic cameras directly to the user's eyes. Its perspective view is from a standing human facing the robot. VETO is an entirely virtual environment where all the displayed rooms, objects, and the robot itself are virtual representations of the real ones. Only when there is a need to identify an obstacle, images from the robot cameras are displayed on a pair of side-by-side windows-like 2D surfaces. This feature makes the need for video transmission occasional, and even when transmitting, the latency issues are hidden by the window-like visualization of the video. VETO aims to be a framework for robot platforms with immersive VR game interfaces. In their paper they present a user study that shows the benefits of using immersive virtual environments for teleoperation in comparison with traditional teleoperation methods.

In summary, a number of the existing VR teleoperation systems present real video visualization from the robot's cameras. Some have chosen to use VR environments to get better control of robots. A few have used mixed reality techniques and have real and virtual visualization working together. Nevertheless, none of them have managed to use a combination of real and virtual visualization to the point of using them interchangeably. The proposed system has an immersive dual visualization (real and virtual) which brings the best of both approaches. Each teleoperation system exists for a specific purpose; ours was to work with humanoid service robots. The visualization

mode can be switched from real to virtual or vice versa to suit user needs. The importance of visualizing the real environment is to make timely control decisions when performing daily life house tasks or interacting with humans. In addition, operating under poor lighting conditions is challenging for most of the existing teleoperation systems. It is tremendously difficult to visualize real video in dark surroundings. Our system overcomes this situation by using the virtual mode and the robot's sensors to continue operating. The lighting conditions are imitated in the virtual environment but preserving the ability to observe all scene elements; therefore, the feeling of presence is unaltered.

Lately, Internet-based robotic teleoperation has become popular. However, Internet's slow rate and connection instability restrict real-time control and feedback. The user may not be able to observe the remote environment real-time changes through video images due to network delays. Although latency is rarely discussed, it is a extremely important issue to overcome. One of this work's goals is to reduce latency to improve user experience. VR visualization use considerably diminishes latency issues since only small data packages containing robot information and commands need to be sent. This approach reduces system traffic compared to transmitting video images and allows proper robot control even when communication rates are slow. By adding a 3D VR environment to simulate the real environment, the proposed system provides the user with a "live" virtual representation of the remote environment instead of the delayed 3D video, which may also increase the efficiency of the user performance.

The discussed works suggest there is a growing trend towards immersive teleoperation interfaces enhanced with mixed reality techniques. Mixed reality techniques and versatile robot control techniques create a symbiosis that can break new ground in the fields of virtual reality and robotics.

### **3. System Design and Development**

**3.1. System overview.** The aim of this work was the creation of a teleoperated service robot system with an immersive mixed reality operation interface. Besides, it was intended that such an operation interface would be easy to use, capable of work on different platforms, and consume as little computer resources as possible.

The proposed system (Figure 1) consists of two parts. For remote device, a service robot with a laptop attached to its back was used (Figure 1 LEFT). This laptop's purpose is to directly control the robot and needs an internet connection to communicate with the operator side. For the operator to control the robot, an immersive operation interface displayed on an HMD was created. Two hardware settings for the operation interface are possible. Setting A (Fig. 1 RIGHT TOP) is an HMD wired connected to a PC and a wired joystick.

Setting B (Figure 1 RIGTH BOTTOM) is an HMD that uses a smartphone as a display and a Bluetooth joystick. In both settings, a stable internet connection is needed.

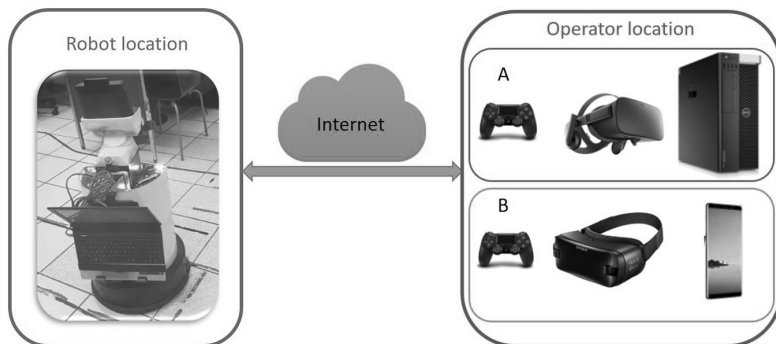


Fig. 1. General system overview. Robot and Operator locations are communicated via regular internet connection. LEFT, Real Service Robot with portable computer device mounted on its back. RIGHT, Operator hardware settings for the immersive experience with two possible configurations (A and B)

To deal with video transmission delay, a mix of visualization modes is proposed: real video mode and virtual environment mode. By having a virtual environment, the resources needed to communicate with the robot can be reduced. Besides, when in need of visualizing the real environment, like on regular teleoperated systems, visualization can be switched from virtual to real or vice versa. This duality allows having the best of both approaches.

The real environment was pre-mapped into the virtual environment, this means the real and virtual environment perfectly match. On the one hand, when using the virtual mode, only real-world robot location has to be transmitted. This reduces the amount of information to be sent and gains efficiency, faster control, and provides a better teleoperation experience. On the other hand, the real video mode can be activated if there is a need to display the robot's view. This mode allows the operator to visualize the real environment through the robot's cameras and determine if the robot is properly performing.

**3.1.1. Hardware.** The service robot used on this work was the Toyota's Human Support Robot (HSR) [25]. HSR is a service robot that has two main purposes: physical work and communication. Although this robot is currently only available for research, it has been used in many international robot competitions such as RoboCup [26] and it is planned to be commercially available soon. Combining 3 degrees of freedom (DOF) of its base, 4 DOF of its arm, and 1 DOF of its torso, the HSR features 8 DOF, allowing flexible

movements for navigation and object manipulation. The HSR also has features like sensors, laser, microphone, stereo and depth cameras, etc. (Figure 2).



Fig. 2. Toyota's Human Support Robot (HSR)

Head-Mounted Displays (HMD) were used to provide immersive sensation. HMDs consist of a screen divided in two to show a different image to each eye of the user with a pair of glasses. The field of view is widened so that the image appears positioned several meters ahead [27]. These virtual reality headsets allow to see a virtual world directly on their screens and allow an immersive sensation in the virtual environment.

In order to test the system performance on different platforms, two different HMDs were used: Setting A, an Oculus Rift connected to a PC (Figure 3 LEFT) and Setting B, a Samsung GearVR with a Samsung Galaxy Note 8 smartphone (Figure 3 RIGHT).



Fig. 3. Hardware Settings. LEFT, Setting A: PC and Oculus Rift. RIGHT, Setting B: Galaxy Note 8 and Gear VR

Oculus Rift [28] is a virtual reality headset developed and manufactured by Oculus VR. Its technical features make it ideal for immersiveness in this system. Samsung GearVR [29] is also a virtual reality headset created by Samsung Electronics in collaboration with Oculus VR and it is compatible with Samsung mobile devices. The screen of these devices is used to display the images, and their accelerometers and gyroscopes are used for rotation tracking. The ability of this headset to work with mobile devices allows them to be easily used in a domestic environment.

The PC used in Setting A has the following features:

- PC Dell Precision Tower 7810
- OS Window 10 64 bit
- Processor Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v4 2.2GHz
- RAM 16 GB
- GPU Quadro P400
- GPU Memory 8GB GDDR5
- CUDA Cores 1792

For controlling and interacting with the virtual environment a joystick was used, the Dualshock 4 [30]. This joystick is the fourth iteration in a line of gamepads developed by Sony Interactive Entertainment for the PlayStation family. It has various buttons for command input, as well as the use of Bluetooth and USB for connectivity with devices other than PlayStation. This feature allows it to be used with PCs and mobile devices with Android.

As it was shown, to make the system accessible to a broader audience, commercial not specialized hardware was used.

**3.1.2. Software.** This system uses ROS (Robot Operating System) for robot main control, and sockets to connect the interface with the robot. ROS [31] is a robotics middleware, a set of software libraries and tools to build robotic applications. The Kinetic version of ROS running on the Ubuntu Operating System (Linux) 16.04 LTS was used.

For autonomous navigation, complex tasks, and robot behaviors, a version of ViRbot (VIRtual and Real roBOT sysTEM) adapted to Toyota's HSR was used. ViRbot [32] is a hybrid robotics architecture to operate autonomous robots. ViRbot system inter-operates with ROS to form an intelligent systems development platform for computer vision, digital signal processing, automatic planning, automatic control, and human-robot interaction. ViRbot was adapted to work with the HSR proprietary libraries and this adapted version has been tested in our HSR at international robot competitions such as RoboCup where it was awarded 2nd place in 2018.

Video game engines have been widely used for robot simulation due to their ease of content creation that allows focusing on more specific topics in

the field of simulation. Game engines include elements for the simulation of physics, lighting, artificial intelligence, rendering, network, etc. The quality that can be achieved with these engines allows creating a simulation convincing enough to be used on the interface virtual mode.

Unity 3D [33] is a video game engine that allows the creation of games for various systems and devices such as PC, Xbox Family, Play Station Family, Nintendo consoles, Android, iOS, Web, etc. Furthermore, Unity 3D uses C# and javascript as base languages to create scripts that model behaviors. As for 3D models, it is possible to use various formats such as .obj, .fbx, and .mb. All these features make Unity ideal for this work. The Unity 3D version used was 2018.2.21f1, running on Windows 10 Professional Operating System.

**3.2. Local interface for teleoperation.** Local interface refers to the operator control interface presented on the HMD. Communication between the local interface and the robot must be precise and fast. Information such as robot position, video from cameras, and control commands need to be transmitted from and to the robot.

To generate an immersive 3D environment, stereo video from the robot's stereoscopic cameras was transmitted to the local interface and displayed on the HMD. On the interface, the operator can visualize a 3D real environment (video mode) or switch to a 3D virtual environment (virtual mode). Additionally, the operator's head movement on the HMD was mapped to the robot's head movement, so that he can freely explore the remote environment by moving his head (Figure 4).



Fig. 4. Mapped head movements. When the user tilts his head up, the robot also tilts its head up

The head movement information was sent to ROS using update messages (detailed on section 3.3) to mimic this movement on the robot. Upon receiving



the update messages, they were published as ROS messages to be executed by the robot. Moreover, precision in the detection of headset movement had to be carefully considered. If not properly managed, even the slightest operator head movement could trigger a robot head movement and this could cause him dizziness. To address this, a threshold for motion detection was implemented. This means, when the movement was under the threshold, the information was not sent to avoid this unpleasant experience.

To control the remaining robot movements, the joystick's buttons and stick were mapped on Unity. By this mapping, Unity gathers information about the direction and speed of the joystick's movements. This information was sent to ROS to be converted into movement commands for the robot. The stick movements were sent as state update messages and the button information as event or command messages (detailed on section 3.3).

For the immersive 3D experience, the images from the robot's stereo cameras were displayed on the headset lenses corresponding to each eye of the user. To achieve this, a connection with the robot was established to receive the images on Unity. The robot can capture video with its frontal and stereo cameras but in image format. This means, the robot cannot capture video, instead, it captures static images. These images are quite large as stereo vision requires images from both stereo cameras (left and right). Thus, a large amount of data was required to be transmitted over the network.

A ROS library, web video server was used to this end. This library allows ROS to convert the robot video images into a stream of compressed mjpeg images. This stream is a continuous sequence of jpeg format images with no headers or footers. This stream was received asynchronously in Unity so that it would not cause slow processing nor affect the images displayed. The images received were assigned to textures and presented to each eye of the user to recreate the video from the real environment with a three-dimensional effect on the HMD.

To deal with data quality of the received video, image enhancement techniques were applied. Those techniques are commonly used to improve the visual appearance of images, in terms of sharpness, distortion, contrast, etc. Enhancement techniques in the spatial domain use the information from the image pixels to perform the enhancement. One of these techniques is the Laplacian Filter [34], which is a high-pass filter that highlights regions with rapid intensity changes and is used for edge detection. The Laplacian  $L(x, y)$  of an image with pixel intensity values  $I(x, y)$  is given by Eq.1. This can be calculated using a convolution filter. Given that the received images are discrete, then a discrete convolution kernel was used. By using this filter, the

edges on the image can be obtained and must be added to the original image to highlight the edges and improve the sharpness.

$$L(x,y) = \frac{\delta^2 I}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 I}{\delta y^2}. \quad (1)$$

The images received as a stream of jpeg images were placed in Texture2D Unity objects and from them, a color matrix was obtained. A convolution was applied to perform filtering and enhancement of the picture. However, image processing can become a time-consuming task, especially when the images to be processed are large. Visualization of real or virtual environments could be considerably affected by this processing and could reduce the user experience fluidity. In such cases, image processing should be performed in parallel to avoid interference with the user experience. This process was made in Unity with an asynchronous task for image processing.

After finishing the image filtering, the main thread detects it and the new texture with the improved image is applied to the objects that show the video on the headset. Then, the filtering process begins anew with the latest received image. This process may cause frame loss, but the latest image is always preserved.

**3.3. Robot-interface communication.** Communications on virtual environments are categorized by Kessler [35] on three main types:

- **Events messages:** Transmit information that cannot be discarded.
- **Command messages:** Similar to event message but require a response.
- **State update messages:** Any transmission about the current state of the shared environment. A state message becomes stale when a new state message is generated for the same set unless an event or command has occurred since the last state update or the full history of state changes is required by the receiver.

Distributed virtual environments usually transmit a large amount of state update messages. A task can not allow losing time receiving old messages. In this work, even though the virtual environment is only on one side of the communication, the information from the real environment was abstracted by the robot. This allowed the information to be handled as if both environments were virtual and thus improve and simplify communication between the virtual interface and the robot.

Sockets were used for robot-interface communication because they provide a simple and reliable way for communication between completely different processes. For instance, they can be used in different systems programmed in

different programming languages running on different OS. This means sockets are suitable to communicate ROS with Unity 3D.

Sockets for trusted and untrusted communication can be implemented on ROS and Unity via C++ or C# code. Trusted communication refers to messages that always arrive at their destination and are implemented by TCP sockets. Trusted communication could be slow to ensure the message's arrival and in case of loss, they are asked to resend the message. This feature makes them ideal for command messages. Untrusted communication refers to messages that may not arrive at their destination and are implemented by UDP sockets. This communication is faster and even with the possible data loss, they are ideal for state update messages.

The laptop attached to the robot (Figure 5 LEFT) contains the ROS nodes and it is connected to the robot via Ethernet cable and to the Internet wirelessly to connect with the interface. Incoming communications on the corresponding ports must be redirected to this computer to ensure proper communication. The device holding the interface (Figure 5 RIGHT) can be connected to the Internet via ethernet, Wi-Fi network, or mobile network (in the case of Samsung Gear VR). Communication must be established from the device running the Unity interface to the computer running ROS. The ROS computer receives the data and converts it to information to be published in ROS for execution by the robot. When it receives information from the nodes, it sends it through the sockets to the connected Unity 3D device.

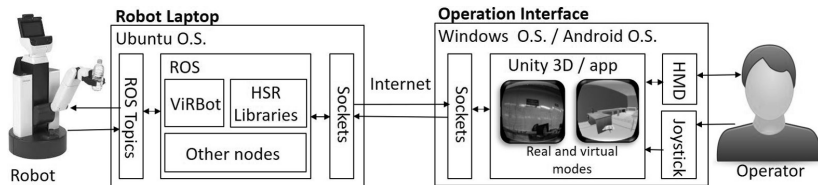


Fig. 5. Immersive Mixed Reality Teleoperation System. The robot laptop controls the robot and gathers the required information from the robot sensors and cameras. It contains all the ROS nodes running on a Ubuntu O.S. and communicates with the operation interface using sockets. The operation interface was created with Unity 3D. It can be executed from Windows for the Oculus (setting A), or from the generated Android app for the Samsung Gear VR (setting B)

**3.4. Virtual environment.** The operator had to be able to control or explore the environment interactively and fluent. This means, the virtual environment had to be able to emulate processes such as real environment and objects physics, graphics display, objects interaction, and artificial intelligence when required.

The Oculus Rift API for Unity 3D, allows to easily integrate the Oculus headset motion recognition, and the accelerometers and gyroscopes of the smartphone inside the Samsung Gear VR. Unity allowed creating the virtual environment for both platforms, Windows for Oculus, and Android for Samsung Gear VR. In the case of Samsung Gear VR, it was required to install the JDK (Java Development Kit) and to have Android SDK (Standard Development Kit) to compile.

The virtual environment was designed and developed to perform the teleoperation of the HSR. To this end, the real HSR was replicated on the virtual environment by an HSR Unity model (Figure 6) from SIGVerse simulator [36].



Fig. 6. Virtual HSR model

SIGVerse is a tridimensional Unity-based simulator created by Dr. Inamura and collaborators [37], which allows 3D environment interactions (perception and action) and was designed to simulate HSR in a domestic environment.

To abstract the real space into the virtual space, adequate corresponding scales were required. Thus, the robot model was used for scale reference to match real and virtual environments. This abstraction was achieved using the robot to map the space where it was going to navigate. Using the robot's laser system with ViRbot modules and its adaptations to HSR, a map of the real environment was obtained by navigating the robot in the real space (Figure 7).



Fig. 7. Biorobotics Laboratory map obtained from HSR using ViRbot

This map image was transferred to Unity 3D in an adequate position and scale (Figure 8 LEFT). With this image as the base floor, fixed objects such as walls, ceiling, floor, or large size furniture were represented on the virtual environment by 3D models on a fixed position corresponding with their real position (Figure 8 RIGHT). When adding a large number of complex structures to the virtual environment, the interface could become slow, thus, it was preferred to use simple 3D models to avoid overload.

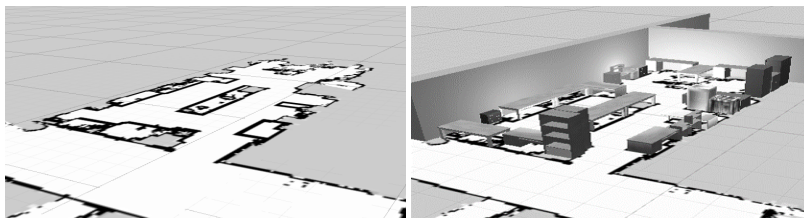


Fig. 8. Map from real space to virtual space

To locate the robot in the virtual space, the real robot used its sensors and ROS libraries to locate itself and transmit its position to the interface to replicate it in the virtual environment. The robot position relative to the map is requested continuously. Once the position was obtained, it was sent to the virtual environment through sockets. Status update messages were used since this information is constantly changing and only the latest available is used. In the virtual environment, the information was received and assigned to the robot model to position it on the corresponding location.

**3.4.1. Lighting conditions.** Most of the existing teleoperation systems face problems when operation under poor lighting conditions (e.g. with lights OFF) as real video visualization becomes hard to achieve. To address this, on the local interface the operator can switch to virtual mode to be able to properly visualize the environment and avoid collisions when moving. Nevertheless, when using teleoperation in virtual environments, the virtual environment must be a close representation of the real environment. This means a change in lighting conditions should be perceived by the operator.

Unity allows creating ambient lights with brightness levels within the virtual environment. These levels can be adjusted in real-time from the brightness information of the real environment. Since the images received from the robot are RGB images, they can be converted to HSV (Hue Saturation Value) space. The HSV color space is an alternative representation of the RGB model commonly used for rendering images. The Hue of this space represents the color, the Saturation represents the intensity of the color, and the Value

represents the brightness of the color. The average from each frame pixel's Value or luminosity was used to set the Unity brightness levels.

**3.5. Implementation overview.** As shown in Figure 5, the implementation of the system is divided into two main parts, Unity and ROS.

In Unity there is a Scene containing all the elements of the local interface. This Scene is presented in the HMD. A virtual camera mapped with the HMD is placed at an initial position inside the Scene (Figure 9). The camera is facing the virtual environment to visualize all the virtual elements on the scene. A couple of 2D planes are placed in the corresponding position with the HMD for each eye. Those planes will display the real video to the user. The images from the stereo cameras are used as a texture for these planes, which provides the 3D effect. When selecting the real visualization mode, the planes are enabled, and the video is displayed on the 2D planes. When switching to virtual mode, the planes are disabled, and the virtual environment can be observed.



Fig. 9. Unity Scene. A virtual camera representing the user is placed at an initial position

To control the robot, the joystick is monitored by Unity to detect stick movement or button pressing and convert this to messages to be sent through sockets. A similar process applies to the head movement but monitoring the HMD movement from Unity. The generated messages are sent to ROS to be processed and executed, and in return, new information from the robot is received in Unity to update the virtual camera position and rotation accordingly to the real robot's base and head positions.

In ROS, the messages arrive through sockets then, they are converted to commands and sent to the robot for its execution. In return, the robot's updated information is converted to messages and returned to Unity via sockets.

For the video transmission, the web video server ROS package was used. In summary, web video server opens a local port and waits for incoming HTTP requests. When a video stream of a ROS image topic is requested via

HTTP, it subscribes to the corresponding topic and creates an instance of the video encoder. The encoded raw video packets are served to the client. Only a URL with some parameters is required to connect to the node [38].

A brief description of the Unity C# classes and their main methods, and ROS nodes and their functions is given below:

**Player** class: Main class, associated with the user. Controls all the functions of the local interface. Initializes and configures data for communications, robot control, visualization, etcetera. Contains *HostAddress*, *HostPortUDP*, and *HostPortTCP* for sockets connections, an array of objects of *MPGJStream* class associated with the planes that display the video, and other helpful elements. Its most relevant methods are: *Start()* - Establishes connections through *ControllerUDP* and *ControllerTCP* and initializes everything. *Update()* - Is continuously executed to update the scene and manages sets the robot position to the corresponding *GameObject* accordingly to robot state data. *moveVirtualHSR()* - Updates the robot state data (position and rotation) with the information received to be used by the *Update* method. *headReceived()* - To confirm the reception of head movement message from the real robot. *leftStick()* and *rightStick()* - To manage the joystick's stick movements and send them through *ControllerUDP* objects. *headRotation()* - Detects head movement from the HMD device and converts it to messages to be sent via UDP sockets. *buttonsDown()* - Manages joystick's buttons pressing and can send TCP or UDP messages configured for each button. Simple commands like close grip or complex commands like go to the kitchen can be assigned to buttons.

**ControllerUDP** class: Manages UDP sockets. Its most relevant methods are: *StartClient()* - Establishes UDP socket connection, receives messages to move robot base and head, and notifies *Player* object when receiving messages to execute *moveVirtualHSR* and *headReceived*. *sendMSG()* - Send message through the established socket.

**ControllerTCP** class: Manages TCP sockets. Its most relevant methods are: *StartClient()* - Establishes TCP/IP socket connection. *sendMSG()* - Send messages through the established socket. *TaskAsyncClient()* and *clientCall()* - Sends messages and receives a response asynchronously when required.

**MJPGStream** class: Manages everything related to video and its display on the planes corresponding to each eye on the HMD. Its most relevant methods are: *Start()* - It connects to the web video server URL to get the images from the robot stereo cameras. Two objects of this class are needed, one for each eye, therefore two URLs with different topics are used. It also initializes a *CustomWebRequest* object to manage the received images. *Update()* - Validates if the images received have finished being processed by the filters and

then applies the images as textures for the planes to visualize on the HMD. *changeTexture()* - when the CustomWebRequest object receives a complete image this method is executed. It calls the *filter* method from this class to enhance the image and the *changeLightValue* method from LightManager class to adjust the environmental lights. *filter()* - Applies the filters to enhance the images in an asynchronous process. In this method, different filters can be configured and use the one that suits best.

**CustomWebRequest** class: Manages the images received from the video web server. Its most relevant method is: *ReceiveData()* - This method executes when data is received. It validates if the information is new or different from the last received. When the complete image is received, it is sent to the *changeTexture* method of the *MJPEGStream* class to process it.

**LightManager** class: Processes the received images to replicate the lighting in the virtual environment. Its most relevant methods are: *changeLightValue()* - Converts all image elements from RGB to HSV to obtain an average Value and assign this to the virtual lights. *resetLight()* - Resets virtual lights to its initial state.

**Server** node: Main ROS node. It contains all the functions needed to manage messages through sockets, convert messages to commands and vice versa, and send commands to robot. Its functions grouped by usability are described next.

**Initialization** functions: To configure ROS topics to subscribe or publish, initialize elements such as threads for TCP and UDP sockets and other utilities.

**ServerTCP** functions: To create TCP sockets, establish communication, receive messages, and send them to the CommandsConverter functions.

**ServerUDP** functions: Same as ServerTCP but for UDP sockets. Additionally, they can send messages when the head moves.

**CommandsConverter** functions: To convert received messages into commands and send them to the CommandsToRobot functions for execution and convert robot information to messages to be sent via sockets back to Unity.

**CommandsToRobot** functions: To send commands to robot for execution. When the command is simple, like move base or head, a ROS message is published to the corresponding ROS topic for execution by the robot. When the command is complex, like “go to the kitchen”, the command is sent to ViRbot (HSR version) to be processed, planned, and executed autonomously by the robot.



## 4. Experiments and Results

**4.1. Local interface tests.** To test the performance of the system, a series of experiments were conducted. First, the experimental environment had to be settled. Our University's BioRobotics Laboratory was selected to act as the real environment space. The laboratory was mapped into the virtual space using the procedure described in the previous section. Furthermore, hardware settings A and B for the interface and the robot were properly set, the required connections were successfully established, and the software was loaded to begin the tests. A compact set of users not experts in the field of VR and teleoperation tested the system. All users received identical instructions as described below.

The interface tests were divided into three types: real mode only, virtual mode only, and mode mixing freely. In all tests, users had to wear the HMD and grab the joystick. Subsequently, the interface was started and connected to the robot to begin the visualization. In real mode tests (Figure 10), the video received from the robot's stereo cameras was displayed on the HMD with a 3D effect. Such visualization provided the users with the immersive sensation of being inside the robot; in other words, they were "seeing what the robot was seeing". The users were requested to move their heads to explore the remote environment. Regular movements were mimicked by the robot as expected, and the users could control the robot's head with their heads. Next, the users were instructed to make slight random movements to test the movement threshold. To prevent these movements from causing unpleasant dizziness, movements below the threshold did not affect the robot's movement.

After exploration by head movement, the users were asked to navigate the robot using the joystick for about 5 to 10 minutes. Once the users got used to controlling the robot with the joystick, they were able to navigate the robot through real space and visualize the environment according to the robot's new position. Navigation tests were fluently and without significant incidents. However, navigation was pretty slow and clumsy. Users had to reduce the speed of the controlling movements to deal with video delays. They explained that when performing fast movements with their head or fast-moving the robot with the joystick, the video had a delay in showing the movement which made them feel dizzy. In addition, they reported having used the move and wait strategy to avoid collisions or getting lost due to the outdated video. The aforementioned video latency incidents turned the user experience less pleasant.

To ameliorate the previous experience, the users were instructed to change to virtual mode and repeat the previous tests in the virtual environment (Figure 11). Users explored and navigated using only virtual mode for about 5 to 10 minutes. In these new tests, the users reported no delay in visualization



Fig. 10. User Experience Real Mode Tests. Visualization, head movement exploration, and robot navigation with the joystick

and smoother navigation and head movement. Users no longer needed to use the move and wait strategy, making their performance visibly faster and more confident.

Finally, the users were allowed to switch modes freely and repeat the explore and navigate tasks for 5 to 10 more minutes. Users preferred to use the virtual model for navigation. Nevertheless, they inclined toward real-mode to explore the details of the environment and verify the robot was performing the same as in the virtual environment. According to users, the teleoperation using this mixed mode felt more comfortable, avoided dizziness, and improved their performance.

User experience could become difficult to measure as it is somewhat subjective. Nevertheless, there are some tools designed to aid in this task. One of the most practical and reliable tools is the System Usability Scale (SUS) [39]. SUS is an inexpensive yet effective tool for assessing the usability of a system. The SUS is composed of ten statements, each having a five-point scale that ranges from Strongly Disagree to Strongly Agree. Its final result is an intuitive 100 points scale. Several studies have shown that SUS results are reliable and accurate. Therefore, SUS has become the most widely used measure of perceived usability [40] and is one of the most used methods in User Experience.



Fig. 11. User Experience Virtual Mode Tests. Visualization, robot navigation, and head movement tests in virtual mode

A SUS questionnaire was applied to users after using the system to evaluate system usability. The answers were processed as indicated by SUS methodology, and an average score was obtained. The usability SUS score of the system was  $80.83 \pm 3.81$ . An “Additional comments” section was included in the questionnaire. In there, users could freely express their impressions of the system. The summary of the most popular comments is shown next.

Comments for Real Mode:

- Liked the ability to see the robot’s cameras images in 3D.
- Dizziness caused by the delay between movements and visualization.
- Easy to navigate with the joystick controller.
- Frustration when attempting to achieve a task due to delays.
- Liked to visualize the real environment to confirm the robot position.

Comments for Virtual Mode:

- Agreeable transition from real to virtual and vice versa.
- Accurate mapping between real and virtual environments.
- Dizziness by delay completely disappeared.
- Smooth movement of the camera accordingly to head’s movement.
- Would like the virtual environment to be a little more realistic.
- Compared the system with a VR video game.

About 80% of the users referred their experience with the system when only using the real mode was quite fascinating but not very comfortable, however when switching to a virtual model, their experience improved, and the uncomfortable sensations diminished or disappeared. 70% explained that using virtual mode only was preferable, but they would have been uncertain about duly completing the desired task. 52% pointed that virtual mode felt like a VR game which could make them forget about the real robot and task. 95% expressed that having the possibility to switch between modes increased their confidence in operating the robot and provided them a feeling of integration between the VR video game-like experience and the visualization of the real 3D cameras.

**4.2. Latency and frame rate tests.** Video delay issues on real mode clearly affected user performance and led to an unpleasant user experience. As users depend on video for perception, direct interfaces typically demand low-delay communications. The virtual mode was devised to reduce latency and cope with these circumstances. To quantify the improvements of using virtual mode over real mode, the following tests were carried out.

Latency and frame rate are the critical points to measure as the user experience entirely depends on them. Distance is another vital point when transmitting a large amount of data. Therefore, we decided to perform the tests using a local network and virtual private networks (VPN) at different distances. VPNs at Tampa (United States), Singapore, and South Africa were used. The data traveled from our Laboratory through the VPN and back to the computer that controls the robot. Given that network traffic varies during the day, the tests were carried out on different days and daytimes.

A stopwatch was started when sending a stream of images (mjpeg) and stopped when receiving the beginning of video measure the video mode latency. In virtual mode, no video data is sent, therefore, to measure virtual mode latency, the response time of robot base movement and robot head movement was recorded. Another stopwatch was implemented on Unity, and it was started when sending a command to the robot. When receiving the command in ROS, a return signal was sent to indicate the correct data was received. In the case of the robot base, the total response time between sending the command and updating the robot position was recorded. In the case of the head, response time only between sending the commands and receiving them to execute in the robot was considered. The same VPNs and conditions for 20 tests were used. The average response time of 20 tests is shown in Table 1.

To better understand the latency results, the response ratios for Video/Base and Video/Head are shown in Table 2. Those ratios are the results of comparing real and virtual modes latencies. They show how much faster

Table 1. Latency Tests. Average response time of 20 tests

Network type	Video Stream (ms)	Robot Base (ms)	Robot Head (ms)
Local Network	844.00	251.650	86.15
VPN Tampa	1816.00	332.65	132.05
VPN Singapore	1624.00	708.30	544.70
VPN South Africa	5187.00	694.50	596.65

the virtual mode is relative to the real mode. For instance, in the local network, the base response time is 3.35 times faster than video, and head response is 9.79 times faster than video.

These results denote the difference between using real and virtual modes. It can be inferred that the improvement is due to the short amount of data sent in virtual mode compared with the video data needed in real mode. In virtual mode, only commands for the movement of the base and head and the location of the robot are required to be transmitted. In real mode, high frame rate video from two cameras is required, which is a large amount of data. Therefore, the virtual mode is faster and more fluid.

Table 2. Latency Tests. Average response ratio of 20 tests

Network type	Video/Base	Video/Head
Local Network	3.35	9.79
VPN Tampa	5.46	13.75
VPN Singapore	2.29	2.98
VPN South Africa	7.47	8.69

A key feature of VR applications is displaying content at a high enough frame rate to provide a compelling experience. Frame rate refers to the frequency at which consecutive images appear on a screen. Human vision can process individual images up to 10 to 12 images per second [41], but images at higher rates are perceived as motion. That means the higher the frame rate is, the smoother the motion will be perceived.

Video mode frame rate was obtained by counting the received images and dividing this number by time. Every time a complete image was received it was accounted into a counter in Unity and then it was divided by time. For virtual mode frame rate, a similar procedure was used. In this case, when the scene was updated, it was added to the counter. The average frame rate obtained is shown in Table 3.

Table 3. Average frame rate of video and virtual modes (frames per second)

Network type	Video	Virtual
Local Network	35.08	316
VPN Tampa	35.79	316
VPN Singapore	34.56	316
VPN South Africa	22.92	316

The received images were processed using image enhancement as explained in section 3.2 before displaying them on the HMD to avoid possible data quality loss on video transmission. Additionally, as images are constantly arriving to generate video, some data losses do not seriously affect the system performance or the user experience. If a frame is lost or damaged, the next frame arriving replaces the missing information, so users do not perceive it is missing. The video quality was subjectively well evaluated by users; only delays caused by latency affected video user experience. Regarding command and robot data, they were sent using trusted communication and implemented by TCP sockets. As explained in section 3.3, this guarantees the delivery of data and packages, then the quality of this data is not compromised. It is worth mentioning that during all the tests, the robot and command data always arrived and were executed successfully.

**4.3. Virtual environment tests.** Virtual environment tests were carried out to measure the closeness between the robot in the real world and its representation in the virtual environment. In addition to navigation and head movement tests reported on section 4.1, location, and illumination tests were performed.

On location tests, the users navigated the robot on the real environment to locate itself (Figure 12 TOP LEFT). The robot used its sensors and the real environment map to obtain the real-world coordinates of its position; the robot location could be visualized on RViz (a 3D visualization tool for ROS) on the ROS computer (Figure 12 TOP RIGHT). Then, the robot's real-world coordinates were transmitted to the interface where Unity mapped them into its coordinate system to display the virtual robot (Figure 12BOTTOM).

Real and virtual robots' positions were properly matched in their corresponding environments. This allowed the users to navigate in both environments interchangeably and thus be able to use the most convenient visualization for each situation.

To test illumination variations, two lightning settings were used: regular illumination (with lights ON) and poor illumination (with lights OFF). In the

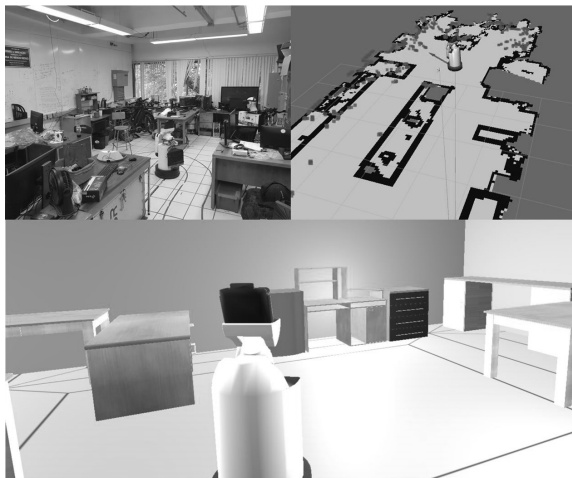


Fig. 12. Localization Test. TOP LEFT, Robot navigating on real space. TOP RIGHT, Robot location found in real-world (RViz). BOTTOM, Robot location represented on virtual space

first case illumination on the virtual environment remained normal (Figure 13 LEFT). In the second case, illumination on the virtual environment was automatically adjusted to darker lighting (Figure 13 RIGHT).

The difference in lighting conditions could be appreciated in the virtual environment but not as drastically as in the real environment which allowed to continue operating the robot even when in the real environment it was not possible.

**5. Discussion.** The tests suggest that the system was able to successfully display 3D video from the robot cameras on the HMD and provide the operator with a compelling immersive experience. Users intuitively interacted with the interface and the remote environment but reported some difficulties visualizing the real 3D environment. The momentary lags on the video screen caused them to switch to a “move and wait” strategy. Otherwise, they would experience dizziness and other uncomfortable effects. Either way, most of them were satisfied with the “seeing what the robot was seeing” experience. The ability to move the robot’s head with the head was well received, and being able to visualize it in 3D was a great improvement. Even with the “move and wait” strategy, the robot’s visual exploration and navigation were successful.

The real-virtual mode switching mechanism was implemented in a joystick button, which allowed users to switch modes at will. When changing to virtual mode, users reported a significant improvement in the visualization



Fig. 13. Illumination Test. Different lighting conditions in real space and their representation in virtual space. LEFT, Lights ON. RIGHT, Lights OFF

and navigation tasks. On the one hand, users preferred to use virtual mode for navigation and only switched to real mode to confirm they had reached the desired location. On the other hand, visual exploration was preferred in real mode even with the waiting issue. They claimed real mode allowed them to appreciate with detail the real remote location.

Regarding the results from the SUS questionnaire, recent research shows that the magnitude of SUS means closely correspond with means of other questionnaires designed to assess perceived usability. Researchers have found that a SUS score below 68 (average SUS score) indicates issues with the design that need to be improved. The SUS average score for this system ( $80.83 \pm 3.81$ ) was visibly above 68, which denotes that the system is “ACCEPTABLE” considering the SUS acceptability ranges (Figure 14). The average score obtained also suggests an adjective rating between “GOOD” and “EXCELLENT”.

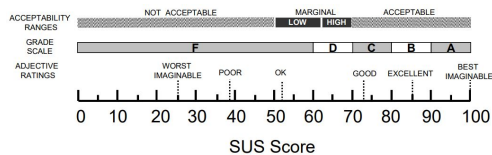


Fig. 14. SUS acceptability [42]

Additional users comments obtained from the questionnaire reveals that the virtual mode seems to have reduced the uncomfortable effects of latency of real-video transmission.

In his work [43], Robert M. Miller claims that a response time of two seconds is a universal requirement for human-computer interaction to be



tolerated and perceived as interactive, and in some cases, up to half a second. Given that one of this system's goals was to provide a convincing immersive user experience, the purpose of having a dual visualization mode was to deal with unpleasant issues caused by latency. On the latency tests (Table 1), it can be observed that video time response in the local network was under 1 second, so it accomplishes the requirement for being perceived as interactive. However, video stream response time considerably increases with distance, up to more than 5 seconds in the farthest location. In contrast, the response time for the robot base and head is significantly lower, and even at the farthest distance, it never exceeds 1 second.

To quantify the improvement in latency of virtual mode over video mode, the Video/Base and Video/Head response ratios are presented in Table 2. On this table, it can be observed that robot base response is up to 7.47 times faster than video stream, and head response up to 13.75 times faster. All these results coincide with the fact that when transmitting real video from the robot's cameras, a large amount of information is sent over the network. On the contrary, only basic information about the robot and the environment is transmitted when visualizing the virtual environment. This denotes that the virtual model relies primarily on the graphics displayed on the local device, not on the streamed video data, which vanishes latency's disgusting effects and improves the user experience.

From table 3, it can be observed that the frame rate was around 35 fps in most of the tests, which is enough to be considered motion video. Nevertheless, some studies have revealed that on VR applications, a frame rate below 90 fps can cause negative effects to the user. "The lower the frame rate, the worse the effects". In this regard, some VR developers guidelines such as Oculus [44], recommend to aim for consistent 90 fps (which is its max supported frame rate) or to maintain 45 fps as minimum specs. This might be another cause of the uncomfortable video mode visualization. However, the frame rate for virtual mode in all the cases was 316 fps, which is above the recommended 90 fps for VR applications. Again these results are consistent with the premise that virtual mode enhances user experience. Analysis of the virtual mode high frame rate suggests that a higher number, textured, or more complex 3D models can be used without diminishing the performance of the virtual visualization. Such improvement on the 3D models would lead to a more realistic virtual environment. This will be considered in future work.

Based on the observations, navigation and other movements of the real robot were mimicked by the virtual robot very closely. Regarding illumination, tests demonstrated that in poor lighting conditions (e.g. with lights OFF), the robot becomes hard to operate in video mode. In such conditions, the robot's

cameras were not able to provide an appropriate view of the environment. This could lead to damaging collisions between the robot and any component of the remote environment. This issue could have been solved by simply changing to virtual mode without considering the light variation, but the feeling of presence would have been diminished by not reflecting the new environmental conditions of the real environment. In addition, the robot's laser sensors can be used to locate it in a completely dark real-world environment as these sensors do not require visible light to work.

Even in poor lighting, the operation was feasible using laser sensors and real environment information in the virtual environment. Users reported being nearly unable to navigate the robot in the dark using the real mode. When switching to the virtual mode, they regained the ability to navigate, maintaining the feeling of presence by visualizing the mimicked lighting conditions on the virtual environment. Finally, it should be noted that a real, uncontrolled Internet connection was used throughout the experiments. This means that in a real environment, this system shows presumably satisfactory results.

In addition to the tests mentioned in section 4, the system was presented in two international robot events. First, the World Robot Summit (WRS) 2018, held in Tokyo, Japan, where our team obtained 4th place at the Partner Robot Challenge (Virtual Space) of the Service Robotics Category (Figure 15). Second, the RoboCup 2019, held in Sydney, Australia, where our team also obtained 4th place at the Domestic Standard Platform of the @Home League. In both events, the teleoperation system was presented as a Demo even when still under development. Some attendants to the events were able to try the system and commented about it briefly.



Fig. 15. World Robot Summit 2018 Tokyo, Japan. Teleoperation System Demo

In summary, they expressed that the system was easy to learn to manipulate thanks to the joystick controller, which provided the feeling of

controlling a video game. The 3D visualization was one of the features that the users enjoyed the most, a significant part of the testers had never experienced or had little experience with a 3D head-mounted display such as Oculus. The real visualization was well received, but the delays caused by latency bothered the users. The main complaints were dizziness, fatigue, and little frustration when trying to perform a task speedily. By switching to virtual mode, all the users felt a substantial improvement, the dizziness and fatigue completely disappeared. The performance also improved, and frustration diminished. After the users felt comfortable with the double-visualization mode, they switched at will from one mode to another to complete the desired tasks. Most of the users were satisfied with the experience and declared that they would use this system in real-life situations. They also expressed happiness when using the system as it sometimes felt like a video game experience. In addition, the users' comments were of great utility when polishing the system features and planning new ones. All these observations match with the comments from the SUS questionnaire applied, which suggests the SUS results are reliable.

**6. Conclusion.** Teleoperated service robots are an excellent option for combining human intelligence and motion skills with the service robots' features. We developed an immersive mixed reality teleoperation system for service robots. This system consists of an interface for robot operation, a communication interface between the robot and the operation interface, and an interactive virtual environment mapping the real environment for the operator interface. In the operation interface, the operator can visualize the remote environment in two modes: 3D video from the robot's stereo cameras and a virtual reality environment that shows a presumably accurate representation of the real environment. The operator can select the visualization mode that best suits the ongoing task and visualize it on the HMD. The operator can control the robot's head movement by moving its head, and other movements using a joystick.

As key contributions of this work we can mention the operator's immersive feeling of presence, the use of consumer-grade hardware and software to operate, enhanced dual visualization of the environment (real 3D and virtual 3D), the comfortable operation by regular joysticks (video-game-like experience) and head controlled robot movement, the latency's unpleasant effects reduced by the use of virtual mode, and the ability to operate the robot under poor lighting conditions without sacrificing the operator's feeling of presence.

For future work, some improvements are being considered. Improvements on 3D models for a more realistic experience in the virtual environment. Real object recognition and virtual representation using deep learning techniques. Person recognition and its representation with avatars in the virtual

environment to add human-robot interaction. In addition, there is some on-going research about automatic virtual environment creation which would be beneficial to add to this work.

The use of mixed reality techniques, such as that proposed in this paper, can greatly improve the operator's user experience, which may lead to broader use of teleoperated service robot systems since it becomes easier for the operator to learn and achieve more complex tasks with ease.

## References

1. Niemeyer G., Preusche C., Stramigioli S., and Lee D. *Telerobotics*. Springer International Publishing, Cham, 2016, pp. 1085–1108.
2. Green M.C., and McAllister C.A. *Presence*. American Cancer Society, 2020, pp. 1–5.
3. Toet A., Kuling I.A., Krom B.N., and van Erp J. B.F. Toward enhanced teleoperation through embodiment. *Frontiers in Robotics and AI* 7 (2020), 14.
4. Lichiardopol S. A survey on teleoperation. Technische Universitat Eindhoven, DCT report 20 (2007), 40–60.
5. Stotko P., Krumpfen S., Schwarz M., Lenz C., Behnke S., Klein R., and Weinmann M. A VR system for immersive teleoperation and live exploration with a mobile robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (Nov 2019).
6. Almeida L., Menezes P., and Dias J. Improving robot teleoperation experience via immersive interfaces. In *2017 4th Experiment@International Conference (exp.at'17)* (2017), pp. 87–92.
7. Chen J., Glover M., Li C., and Yang C. Development of a user experience enhanced teleoperation approach. In *2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)* (2016), pp. 171–177.
8. Schäfer A., Reis G., and Stricker D. Investigating the sense of presence between hand-crafted and panorama based virtual environments. preprint arXiv:2107.03823 (2021).
9. Mütterlein J., and Hess T. Immersion, presence, interactivity: Towards a joint understanding of factors influencing virtual reality acceptance and use. *Twenty-third Americas Conference on Information Systems* (2017).
10. Gradedcki J. *The Virtual Reality Programmer's Kit*. Wiley, 1994.
11. Hetrick R., Amerson N., Kim B., Rosen E., Visser E.J.d., and Phillips E. Comparing virtual reality interfaces for the teleoperation of robots. In *2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)* (2020), pp. 1–7.
12. Whitney D., Rosen E., Ullman D., Phillips E., and Tellex S. Ros reality: A virtual reality framework using consumer-grade hardware for ros-enabled robots. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2018), IEEE, pp. 1–9.
13. Lee J., Kim M., and Kim J. A study on immersion and vr sickness in walking interaction for immersive virtual reality applications. *Symmetry* 9, 5 (2017).
14. Rogers H., Khasawneh A., Bertrand J., and Madathil K.C. An investigation of the effect of latency on the operator's trust and performance for manual multi-robot teleoperated tasks. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (2017), vol. 61, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, pp. 390–394.
15. Sheridan T.B., and Ferrell W.R. Remote manipulative control with transmission delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics* (1963), 25–29.
16. Lane J.C., Carignan C.R., Sullivan B.R., Akin D.L., Hunt T., and Cohen R. Effects of time delay on telerobotic control of neutral buoyancy vehicles. In *Proceedings 2002 IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292) (2002), vol. 3, IEEE, pp. 2874–2879.
17. Bouzakaria N., Concolato C., and Le Feuvre J. Overhead and performance of low latency live streaming using MPEG-DASH. In IISA 2014, The 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (2014), IEEE, pp. 92–97.
  18. Kebria P.M., Abdi H., Dalvand M.M., Khosravi A., and Nahavandi S. Control methods for internet-based teleoperation systems: A review. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 49, 1 (2019), 32–46.
  19. Kebria P.M., Khosravi A., Nahavandi S., Shi P., and Alizadehsani R. Robust adaptive control scheme for teleoperation systems with delay and uncertainties. *IEEE Transactions on Cybernetics* 50, 7 (2020), 3243–3253.
  20. Young J., Sharlin E., and Igarashi T. What is mixed reality, anyway? considering the boundaries of mixed reality in the context of robots. In *Mixed Reality and Human-Robot Interaction*. Springer, 2011, pp. 1–11.
  21. Milgram P., and Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77, 12 (1994), 1321–1329.
  22. Lipton J.I., Fay A.J., and Rus D. Baxter’s homunculus: Virtual reality spaces for teleoperation in manufacturing. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 1 (2018), 179–186.
  23. Wen M.C., Yang C.H., Tsai M.H., and Kang S.C. Teleyes: A telepresence system based on stereoscopic vision and head motion tracking. *Automation in Construction* 89 (2018), 199–213.
  24. Wilson B., Bounds M., McFadden D., Regenbrecht J., Ohenhen L., Tavakkoli A., and Loffredo D. VETO: An immersive virtual environment for tele-operation. *Robotics* 7, 2 (2018), 26.
  25. Yamamoto T., Nishino T., Kajima H., Ohta M., and Ikeda K. Human support robot (HSR). In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies* (New York, NY, USA, 2018), SIGGRAPH ’18, ACM, pp. 11:1–11:2.
  26. Kitano H., Asada M., Kuniyoshi Y., Noda I., and Osawa E. Robocup: The robot world cup initiative. In *Proceedings of the first international conference on Autonomous agents* (1997), pp. 340–347.
  27. Shibata T. Head mounted display. *Displays* 23, 1-2 (2002), 57–64.
  28. Desai P.R., Desai P.N., Ajmera K.D., and Mehta K. A review paper on Oculus Rift-A Virtual Reality Headset, arXiv preprint arXiv:1408.1173 (2014).
  29. Webster R., and Jr. J. F.D. System usability scale (SUS): Oculus Rift® DK2 and Samsung Gear VR®. In *2017 ASEE Annual Conference & Exposition* (Columbus, Ohio, June 2017), ASEE Conferences. <https://peer.asee.org/28899>.
  30. Parisi D. A counterrevolution in the hands: The console controller as an ergonomic branding mechanism. *Journal of Games Criticism* 2, 1 (2015), 1–23.
  31. Koubâa A. *Robot Operating System (ROS)*, vol. 1. Springer, 2019.
  32. Savage J., LLarena A., Carrera G., Cuellar S., Esparza D., Minami Y., and Peñuelas U. ViRbot: A system for the operation of mobile robots. In *RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI* (Berlin, Heidelberg, 2008), U. Visser, F. Ribeiro, T. Ohashi, and F. Dellaert, Eds., Springer Berlin Heidelberg, pp. 512–519.
  33. Creighton R. H. *Unity 3D game development by example: A Seat-of-your-pants manual for building fun, groovy little games quickly*. Packt Publishing Ltd, 2010.
  34. Fisher R., Perkins S., Walker A., and Wolfart E. *Laplacian/laplacian of gaussian*. Hypermedia Image Processing Reference (2003).
  35. Kessler G.D., and Hodges L.F. A network communication protocol for distributed virtual environment systems. In *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium* (1996), pp. 214–221.

36. SIGVerse. <http://www.sigverse.org/wiki/en/>
37. Inamura T., Shibata T., Sena H. Hashimoto T., Kawai N., Miyashita T., Sakurai Y., Shimizu M., Otake M., Hosoda K. Simulator platform that enables social interaction simulation — SIGVerse: SocioIntelliGenesis simulator. In Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2010), pp. 212–217.
38. ROS web video server package. [http://wiki.ros.org/web\\_video\\_server](http://wiki.ros.org/web_video_server).
39. Brooke, J., et al. SUS: A quick and dirty usability scale. Usability evaluation in industry 189, 194 (1996), 4–7.
40. Lewis, J. R. The system usability scale: Past, present, and future. International Journal of Human–Computer Interaction 34, 7 (2018), 577–590.
41. Read P., and Meyer M.P. Restoration of motion picture film. Elsevier, 2000.
42. Bangor, A., Kortum, P., and Miller, J. Determining what individual sus scores mean: Adding an adjective rating scale. Journal of usability studies 4, 3 (2009), 114–123.
43. Miller R.B. Response time in man-computer conversational transactions. In AFIPS Fall Joint Computing Conference (1) (1968), vol. 33 of AFIPS Conference Proceedings, AFIPS / ACM / Thomson Book Company, Washington D.C., pp. 267–277.
44. VR performance optimization. <https://developer.oculus.com/documentation/native/pc/dg-performance-guidelines/>

**Nakayama Angelica** – Ph.D., Professor, Institute of research in applied mathematics and systems, department of electrical engineering, engineering faculty, National Autonomous University of Mexico. Research interests: autonomous mobile robots, virtual reality, machine learning. The number of publications – 2. [annkym@gmail.com](mailto:annkym@gmail.com); 3000, Sirkuito Eskolar, Av. Universidad, 04510, Mexico City, Mexico; office phone: +52(55)56223041.

**Ruelas Daniel** – Professor, Institute of research in applied mathematics and systems, sciences faculty, National Autonomous University of Mexico. Research interests: virtual reality, videogame development. The number of publications – 0. [sango265@ciencias.unam.mx](mailto:sango265@ciencias.unam.mx); 3000, Sirkuito Eskolar, Av. Universidad, 04510, Mexico City, Mexico; office phone: +52(55)56223041.

**Savage Jesus** – Ph.D., Professor, Electrical engineering department, National Autonomous University of Mexico. Research interests: autonomous mobile robots, digital signal processing, computer architectures. The number of publications – 0. [robotssavage@gmail.com](mailto:robotssavage@gmail.com); 3000, Sirkuito Eskolar, Av. Universidad, 04510, Mexico City, Mexico; office phone: +52(55)56223041.

**Bribiesca Ernesto** – Ph.D., Professor, Institute of research in applied mathematics and systems, National Autonomous University of Mexico. Research interests: pattern recognition, computer vision, chain coding. The number of publications – 100. [bribiesca@iimas.unam.mx](mailto:bribiesca@iimas.unam.mx); 3000, Sirkuito Eskolar, Av. Universidad, 04510, Mexico City, Mexico; office phone: +52(55)56223617.

**Acknowledgements.** This research was supported by PAPIIT-DGAPA UNAM, Mexico, under Grant AG101721, and by CONACYT Mexico Graduate Scholarship Program.

А. НАКАЯМА, Д. РУЭЛАС, Х. САВАЖ, Э. БРИБЕСКА  
**ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЙ СЕРВИСНЫЙ РОБОТ С  
ИММЕРСИВНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ СМЕШАННОЙ  
РЕАЛЬНОСТИ**

*Накаяма А., Руэлас Д., Саваж Х., Брибеска Э. Дистанционно управляемый сервисный робот с иммерсивным интерфейсом смешанной реальности.*

**Аннотация.** Сервисные роботы с дистанционным управлением могут выполнять более сложные и точные задачи, поскольку они сочетают в себе навыки робота и человеческий опыт. Связь между оператором и роботом важна для удаленной работы и сильно влияет на эффективность системы. Существует мнение, что улучшение ощущения присутствия оператора также улучшает выполнение задачи. Иммерсивные интерфейсы используются для улучшения опыта удаленной работы, поскольку ощущение присутствия является результатом погружения. Однако задержка или временная задержка могут снизить производительность робота. Временная задержка между входом и визуальной обратной связью сильно влияет на обмен данными между распределенными ведущими и ведомыми системами по сети. Поскольку удаленная визуализация включает в себя передачу большого количества видеоданных, проблема заключается в снижении нестабильности связи. Затем эффективная система дистанционного управления должна иметь подходящий рабочий интерфейс, способный визуализировать удаленную среду, управлять роботом и иметь быстрое время отклика. Эта работа представляет собой разработку системы дистанционного управления сервисным роботом с иммерсивным операционным интерфейсом смешанной реальности, где оператор может визуализировать реальную удаленную среду или виртуальную трехмерную среду, представляющую ее. Виртуальная среда направлена на сокращение задержки при обмене данными за счет уменьшения объема информации, отправляемой по сети, и улучшения взаимодействия с пользователем. Робот может выполнять навигацию и простые задачи автономно или переключаться в дистанционно управляемый режим для более сложных задач. Система была разработана с использованием ROS, UNITY 3D и сокетов для легкого экспорта на различные платформы. Эксперименты показывают, что наличие иммерсивного рабочего интерфейса повышает удобство использования для оператора. Задержка при использовании виртуальной среды увеличивается. Пользовательский опыт улучшается за счет использования техник смешанной реальности; это может привести к более широкому использованию дистанционно управляемых систем сервисных роботов.

**Ключевые слова:** дистанционно управляемый робот, сервисный робот, иммерсивный рабочий интерфейс, интерфейс смешанной реальности, среда виртуальной реальности

**Накаяма Анжелика** – профессор, институт исследований прикладной математики и систем, отдел электротехники, инженерный факультет, Национальный автономный университет Мексики (НАУМ). Область научных интересов: автономные мобильные роботы, виртуальная реальность, машинное обучение. Число научных публикаций – 2. annkym@gmail.com; Сиркуито Эсколар, проспект Универсидад, 3000, 04510, Мехико, Мексика; р.т.: +52(55)56223041.

**Руэлас Дэниел** – профессор, институт исследований прикладной математики и систем, факультет естественных наук, Национальный автономный университет Мексики (НАУМ). Область научных интересов: виртуальная реальность, разработка видеонигр. Число научных публикаций – 0. sango265@ciencias.unam.mx; Сиркуито Эсколар, проспект Универсидад, 3000, 04510, Мехико, Мексика; р.т.: +52(55)56223041.

**Саваж Хесус** – профессор, электротехнический отдел, Национальный автономный университет Мексики (НАУМ). Область научных интересов: автономные мобильные роботы,

цифровая обработка сигналов, компьютерная архитектура. Число научных публикаций – 0. robotssavage@gmail.com; Сиркуито Эсколар, проспект Универсидад, 3000, 04510, Мехико, Мексика; р.т.: +52(55)56223041.

**Брибеска Эрнесто** – профессор, институт исследований прикладной математики и систем, Национальный автономный университет Мексики (НАУМ). Область научных интересов: распознавание образов, компьютерное зрение, цепное кодирование. Число научных публикаций – 100. bribesca@iimas.unam.mx; Сиркуито Эсколар, проспект Универсидад, 3000, 04510, Мехико, Мексика; р.т.: +52(55)56223617.

**Поддержка исследований.** Это исследование было поддержано программой PAPIIT-DGAPA UNAM в Мексике, в рамках Гранта AG101721, и стипендиальной программой для выпускников CONACYT в Мексике.

## Литература

1. Niemeyer G., Preusche C., Stramigioli S., and Lee D. Telerobotics. Springer International Publishing, Cham, 2016, pp. 1085–1108.
2. Green M.C., and McAllister C.A. Presence. American Cancer Society, 2020, pp. 1–5.
3. Toet A., Kuling I.A., Krom B.N., and van Erp J. B.F. Toward enhanced teleoperation through embodiment. *Frontiers in Robotics and AI* 7 (2020), 14.
4. Lichiardopol S. A survey on teleoperation. Technische Universitat Eindhoven, DCT report 20 (2007), 40–60.
5. Stotko P., Krumpen S., Schwarz M., Lenz C., Behnke S., Klein R., and Weinmann M. A VR system for immersive teleoperation and live exploration with a mobile robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (Nov 2019).
6. Almeida L., Menezes P., and Dias J. Improving robot teleoperation experience via immersive interfaces. In *2017 4th Experiment@International Conference (exp.at'17)* (2017), pp. 87–92.
7. Chen J., Glover M., Li C., and Yang C. Development of a user experience enhanced teleoperation approach. In *2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)* (2016), pp. 171–177.
8. Schäfer A., Reis G., and Stricker D. Investigating the sense of presence between handcrafted and panorama based virtual environments. preprint arXiv:2107.03823 (2021).
9. Mütterlein J., and Hess T. Immersion, presence, interactivity: Towards a joint understanding of factors influencing virtual reality acceptance and use. *Twenty-third Americas Conference on Information Systems* (2017).
10. Gradecki J. *The Virtual Reality Programmer's Kit*. Wiley, 1994.
11. Hetrick R., Amerson N., Kim B., Rosen E., Visser E.J.d., and Phillips E. Comparing virtual reality interfaces for the teleoperation of robots. In *2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)* (2020), pp. 1–7.
12. Whitney D., Rosen E., Ullman D., Phillips E., and Tellex S. Ros reality: A virtual reality framework using consumer-grade hardware for ros-enabled robots. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2018), IEEE, pp. 1–9.
13. Lee J., Kim M., and Kim J. A study on immersion and vr sickness in walking interaction for immersive virtual reality applications. *Symmetry* 9, 5 (2017).
14. Rogers H., Khasawneh A., Bertrand J., and Madathil K.C. An investigation of the effect of latency on the operator's trust and performance for manual multi-robot teleoperated tasks. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (2017), vol. 61, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, pp. 390–394.



15. Sheridan T.B., and Ferrell W.R. Remote manipulative control with transmission delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics* (1963), 25–29.
16. Lane J.C., Carignan C.R., Sullivan B.R., Akin D.L., Hunt T., and Cohen R. Effects of time delay on telerobotic control of neutral buoyancy vehicles. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 02CH37292) (2002), vol. 3, IEEE, pp. 2874–2879.
17. Bouzakaria N., Concolato C., and Le Feuvre J. Overhead and performance of low latency live streaming using MPEG-DASH. In *IISA 2014, The 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications* (2014), IEEE, pp. 92–97.
18. Kebria P.M., Abdi H., Dalvand M.M., Khosravi A., and Nahavandi S. Control methods for internet-based teleoperation systems: A review. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 49, 1 (2019), 32–46.
19. Kebria P.M., Khosravi A., Nahavandi S., Shi P., and Alizadehsani R. Robust adaptive control scheme for teleoperation systems with delay and uncertainties. *IEEE Transactions on Cybernetics* 50, 7 (2020), 3243–3253.
20. Young J., Sharlin E., and Igarashi T. What is mixed reality, anyway? considering the boundaries of mixed reality in the context of robots. In *Mixed Reality and Human-Robot Interaction*. Springer, 2011, pp. 1–11.
21. Milgram P., and Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77, 12 (1994), 1321–1329.
22. Lipton J.I., Fay A.J., and Rus D. Baxter’s homunculus: Virtual reality spaces for teleoperation in manufacturing. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 1 (2018), 179–186.
23. Wen M.C., Yang C.H., Tsai M.H., and Kang S.C. Teleyes: A telepresence system based on stereoscopic vision and head motion tracking. *Automation in Construction* 89 (2018), 199–213.
24. Wilson B., Bounds M., McFadden D., Regenbrecht J., Ohenhen L., Tavakkoli A., and Loffredo D. VETO: An immersive virtual environment for tele-operation. *Robotics* 7, 2 (2018), 26.
25. Yamamoto T., Nishino T., Kajima H., Ohta M., and Ikeda K. Human support robot (HSR). In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies* (New York, NY, USA, 2018), SIGGRAPH ’18, ACM, pp. 11:1–11:2.
26. Kitano H., Asada M., Kuniyoshi Y., Noda I., and Osawa E. Robocup: The robot world cup initiative. In *Proceedings of the first international conference on Autonomous agents* (1997), pp. 340–347.
27. Shibata T. Head mounted display. *Displays* 23, 1-2 (2002), 57–64.
28. Desai P.R., Desai P.N., Ajmera K.D., and Mehta K. A review paper on Oculus Rift-A Virtual Reality Headset, arXiv preprint arXiv:1408.1173 (2014).
29. Webster R., and Jr. J. F.D. System usability scale (SUS): Oculus Rift® DK2 and Samsung Gear VR®. In *2017 ASEE Annual Conference & Exposition* (Columbus, Ohio, June 2017), ASEE Conferences. <https://peer.asee.org/28899>.
30. Parisi D. A counterrevolution in the hands: The console controller as an ergonomic branding mechanism. *Journal of Games Criticism* 2, 1 (2015), 1–23.
31. Koubâa A. *Robot Operating System (ROS)*, vol. 1. Springer, 2019.
32. Savage J., LLarena A., Carrera G., Cuellar S., Esparza D., Minami Y., and Peñuelas U. ViRbot: A system for the operation of mobile robots. In *RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI* (Berlin, Heidelberg, 2008), U. Visser, F. Ribeiro, T. Ohashi, and F. Dellaert, Eds., Springer Berlin Heidelberg, pp. 512–519.
33. Creighton R. H. *Unity 3D game development by example: A Seat-of-your-pants manual for building fun, groovy little games quickly*. Packt Publishing Ltd, 2010.

34. Fisher R., Perkins S., Walker A., and Wolfart E. Laplacian/laplacian of gaussian. Hypermedia Image Processing Reference (2003).
35. Kessler G.D., and Hodges L.F. A network communication protocol for distributed virtual environment systems. In Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium (1996), pp. 214–221.
36. SIGVerse. <http://www.sigverse.org/wiki/en/>
37. Inamura T., Shibata T., Sena H. Hashimoto T., Kawai N., Miyashita T., Sakurai Y., Shimizu M., Otake M., Hosoda K. Simulator platform that enables social interaction simulation — SIGVerse: SocioIntelliGenesis simulator. In Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2010), pp. 212–217.
38. ROS web video server package. [http://wiki.ros.org/web\\_video\\_server](http://wiki.ros.org/web_video_server).
39. Brooke, J., et al. SUS: A quick and dirty usability scale. Usability evaluation in industry 189, 194 (1996), 4–7.
40. Lewis, J. R. The system usability scale: Past, present, and future. International Journal of Human–Computer Interaction 34, 7 (2018), 577–590.
41. Read P., and Meyer M.P. Restoration of motion picture film. Elsevier, 2000.
42. Bangor, A., Kortum, P., and Miller, J. Determining what individual sus scores mean: Adding an adjective rating scale. Journal of usability studies 4, 3 (2009), 114–123.
43. Miller R.B. Response time in man-computer conversational transactions. In AFIPS Fall Joint Computing Conference (1) (1968), vol. 33 of AFIPS Conference Proceedings, AFIPS / ACM / Thomson Book Company, Washington D.C., pp. 267–277.
44. VR performance optimization. <https://developer.oculus.com/documentation/native/pc/dg-performance-guidelines/>

Р.Р. ГАЛИН, А.А. ШИРОКИЙ, Е.А. МАГИД, Р.В. МЕЩЕРЯКОВ,  
М.В. МАМЧЕНКО

**ЭФФЕКТИВНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СМЕШАННОЙ  
НЕОДНОРОДНОЙ КОМАНДЫ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

*Галин Р.Р., Широкий А.А., Магид Е.А., Мещеряков Р.В., Мамченко М.В. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе.*

**Аннотация.** В статье представлены описание коллаборативного робота (кобота) как одного из подвидов интеллектуальной робототехники и его отличительные особенности по сравнению с другими видами роботов. Дано описание коллаборативной робототехнической системы как единой комплексной системы, в которой субъекты (акторы) различного типа – коботы и люди – выполняют действия в рамках коллаборации для достижения единой цели. Для коллаборативной робототехнической системы как единой комплексной системы представлены ее составные части, а также процессы и сущности, которые оказывают непосредственное влияние на эту систему. Представлены ключевые принципы коллаборации человека и робота (Human-Robot Collaboration). Коллаборативная робототехническая система проанализирована, с одной стороны, как многоагентная система, и, с другой стороны, как смешанная неоднородная команда, члены которой являются гетерогенными акторами. Актуальность работы заключается в недостаточном уровне исследованности вопроса формирования смешанных неоднородных команд из людей и коботов и распределения задач в них с учетом специфики этих двух типов участников и требований их безопасного взаимодействия. Целью работы является исследование вопросов формирования смешанных команд из числа элементов единой комплексной системы человек-кобот, распределения задач среди участников подобных команд с учетом необходимости минимизации затрат для ее участников и гетерогенности ее состава. В рамках исследования представлена постановка задачи формирования смешанной неоднородной команды из числа людей и коботов и распределения работ между членами команды, а также ее математическое описание. Рассматриваются частные случаи задачи, в том числе при различных функциях затрат у разных видов участников, в случае ограниченной активности членов команды, при наличии зависимости функций затрат участников одного типа от числа назначенных на этот вид работ участников другого типа, а также в случае наличия произвольного количества видов работ, назначаемых участникам смешанной команды.

**Ключевые слова:** коллаборативный робот, многоагентная система, смешанная неоднородная команда, взаимодействие человека и робота.

**1. Введение.** В ходе проектирования и разработки автоматизированных систем на производстве на основе использования робототехнических решений, повсеместная и полная замена роботами людей-операторов для выполнения производственных операций (реализация т. н. безлюдных производств), вне зависимости от специфики используемых технологических процессов и сложности выполняемых действий, на данном этапе оказалась невозможной. Работа на промыш-

ленных сборочных линиях по-прежнему требует труда большого количества людей, а вопрос о том, как автоматизировать ручной процесс сборки многокомпонентных деталей или обработки сложных изделий с различными свойствами и составом материалов, продолжает оставаться открытым [1]. Несмотря на это, автоматизация отдельных производственных мощностей и линий предприятий за счет внедрения робототехнических решений продолжает активно расти. Следует особо отметить, что спросом для этих целей пользуются именно интеллектуальные роботы, обладающие функциями частичной автономности действий.

Одним из направлений развития интеллектуальной робототехники является переход от использования функциональных роботов, предназначенных для выполнения одной или нескольких конкретных функций (работ), к интерактивным, особенностью которых является способность безопасного взаимодействия с человеком. Одним из примеров интерактивного робота является кобот (коллаборативный робот). Коллаборативные роботы предназначены для работы в едином рабочем пространстве с человеком без риска нанесения вреда последнему (т.н. коллаборативное взаимодействие [2–5]) и обладают рядом преимуществ по сравнению с промышленными, в пользу чего свидетельствует рост активности интеграции коботов в различных отраслях производства [6, 7].

Комплексность решаемых задач интеллектуальными коллаборативными роботами обуславливает повышенные требования к обеспечению безопасного процесса деятельности совместно с человеком-оператором в рамках единой комплексной системы, взаимодействующими и взаимосвязанными элементами которой являются человек и кобот [8]. В подобных системах коллаборативного робота возможно рассматривать как отдельную техническую систему, способную выполнять полезные действия; вторым элементом системы является человек-оператор, обладающий способностями самостоятельно принимать решения и выполнять целенаправленные и конкретные операции во взаимодействии с коботом для достижения общей цели системы.

Несмотря на актуальность направлений исследований в области коллаборативной робототехники, недостаточно проработанным остается вопрос формирования (подбора по составу) смешанных команд из числа людей и коботов и распределения задач в них с учетом специфики гетерогенных акторов и требований безопасности их совместной деятельности (подробнее в главах 3–5). В настоящей работе представлено исследование вопросов формирования смешанных неоднородных команд из числа участников КРТС и распределения задач в

команде с учетом необходимости минимизации затрат для ее участников и различных значений эффективности выполнения конкретными участниками определенных видов работ.

**2. Робот как элемент коллаборативной робототехнической системы.** Рабочее пространство для безопасного взаимодействия с коллаборативным роботом должно быть спроектировано с точки зрения эргономики рабочего места. Наличие технических объектов и дополнительного оборудования в рабочем пространстве не должно создавать угрозу безопасности человека. В рассматриваемой системе определены различные области рабочего пространства, которые представлены на рисунке 1. Данные области рабочего пространства можно описать следующим образом [9]:

- предельно допустимое рабочее пространство (*maximum workspace*) — пространство, которое определяется максимальным значением радиуса коллаборативного робота – зона досягаемости с учетом элементов захвата, установленных на фланце робота;

- пространство ограниченного доступа (*restricted workspace*) — зона рабочей области в рамках предельно допустимого рабочего пространства. Данная зона рабочей области обусловлена наличием элементов робототехнической системы – совместная рабочая ячейка или коллаборативное приложение. Это означает, что речь идет не только о роботе, но и о инструментах, кабелях, рабочего стола, т.е. все то, что входит в данную зону рабочей области [10]. Наличие этих элементов системы создает условия ограниченного доступа;

- операционное пространство (*operating workspace*) — рабочая область, в которой осуществляются операционные действия коллаборативным роботом;

- коллаборативное пространство (*collaborative workspace*) — рабочая зона совместных операция (одновременно/параллельно) коллаборативного робота и человека.

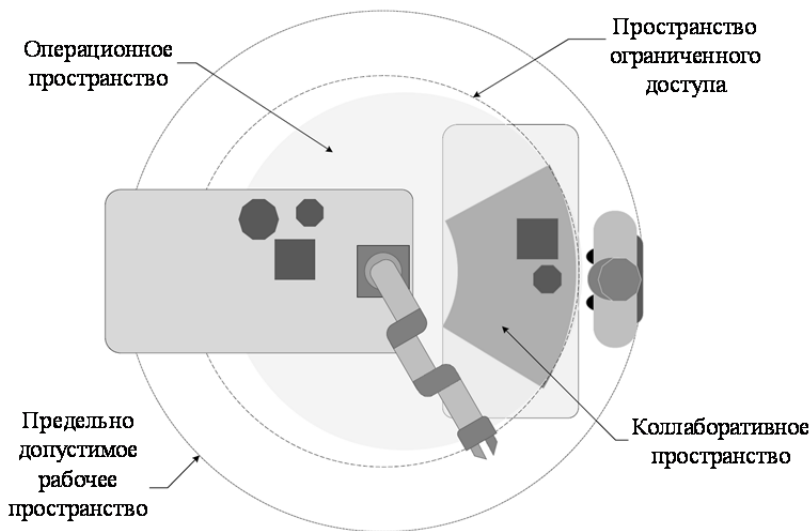


Рис. 1. Области рабочего пространства в робототехнической системе человек–робот

Авторы рассматривают представленную робототехническую систему с точки зрения ее комплексности. Для понимания комплексности необходимо учитывать следующие сущности и объекты, которые непосредственно оказывают влияние на саму систему (в целом) и/или ее подсистемы (в частности). К таким сущностям и объектам можно причислить:

- технологический процесс выполнения операций;
- технические объекты и подсистемы разного уровня иерархии;
- объекты, которые используются элементами системы в процессе деятельности (например, инструменты);
- среда, необходимая для функционирования системы.

Таким образом, рассмотрение вышеуказанной единой комплексной системы человек–робот как совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих ее элементов является неполным. Необходимо учитывать требуемые для ее функционирования ресурсы, взаимодействие элементов с окружающей средой, управляющие воздействия и последовательность выполнения команд. Иными словами, именно подобное (расширенное) толкование рассматриваемой единой системы человек–робот будет отвечать ее работоспособности и комплексности.

Представим систему взаимодействия человека и робота в качестве двух одноименных взаимодействующих подсистем. Тогда подсистема «Человек» будет включать в себя не только самого работника, но и блок обработки информации, поступающей от робота, о ходе выполнения задач, и блока управляющих воздействий, направляемых роботу как в явном (в виде передачи команд), так и в неявном виде (например, за счет подстраивания работы робота под действия человека). В свою очередь, подсистема «Робот» состоит из робота, органов управления, осуществляющих прием и обработку управляющих воздействия от человека и выдачу команд для актуаторов и манипулятора, а также блока отображения информации для подготовки и передачи человеку необходимых данных о текущем состоянии выполнения работы. Упрощенная схема взаимодействия элементов в единой комплексной системе человек–робот представлена на рисунке 2.

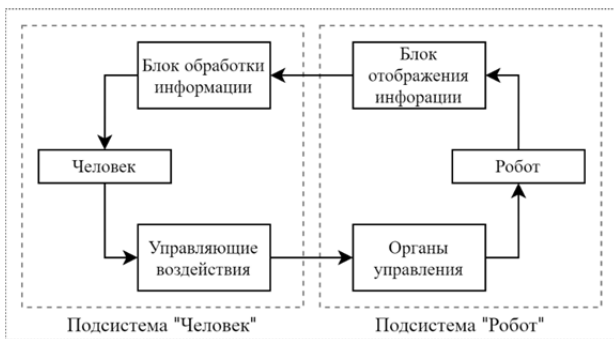


Рис. 2. Схематичное представление единой комплексной системы человек–робот

В представленной схеме подсистема «Робот» является элементом робототехнической системы [11, 12], а наличие подсистемы «Человек» в единой системе позволяет рассматривать ее в качестве эргатической робототехнической системы [13]. Кроме того, учитывая использование именно коботов в рамках настоящей работы, подобную комплексную систему можно назвать коллаборативной робототехнической системой (КРТС). В рамках данной работы именно это понятие будет использоваться в дальнейшем для описания единой комплексной системы человек–кобот.

В процесс проектирования КРТС в обязательном порядке должны учитываться следующие четыре ключевых принципа взаимодействия человека и робота (HRC – Human-Robot Collaboration) [14–16]:

- операции, выполняемые роботом, должны быть безопасны по отношению к другим агентам, расположенным в области рабочего пространства (в первую очередь, к человеку-оператору), а также к объектам внешней среды;

- робот должен приспосабливаться к человеку, а не наоборот. В случае, если КРТС функционирует недостаточно эффективно, то необходимо вносить изменения в рабочий процесс робота, а не искать замену человеку;

- должны создаваться такие условия, в которых любой человек-оператор в области рабочего пространства мог бы максимально использовать возможности робота;

- при проектировании системы следует добиваться повышения производительности труда и снижения вероятности возникновения ошибок за счет эргономического дизайна и/или упрощения конструкции.

Таким образом, КРТС, которую можно рассматривать в качестве отдельной производственной единицы на предприятии, обладает уникальными свойствами, в первую очередь связанными с гетерогенностью двух типов входящих в нее акторов – людей и роботов. Эти разнородные члены команды могут использовать различные подходы к выполнению производственных операций: роботы действуют в основном на основании имеющейся программы, и их действия повторяются для одинаковых операций, в то время как люди могут использовать креативность и нестандартные подходы к выполнению задач. Второй значимой особенностью КРТ является необходимость соблюдения мер безопасности и вытекающие из этого особенности размещения рабочего пространства для людей и технические спецификации роботов (наличие силомоментных датчиков, контроль скорости движения и т.д.).

**3. Анализ КРТС как многоагентной системы и смешанной неоднородной команды.** Участники КРТС взаимодействуют в единой области рабочего пространства для выполнения единой глобальной целевой задачи. Такие задачи могут быть решены с применением технологий многоагентных систем. Исследование многоагентных систем с участием людей и роботов осуществлялось в работах [17–19]. В частности, в [17] рассматривались подходы к решению задачи управления человеком группой роботов. В [20] представлены централизованные и децентрализованные методы распределения задач между агентами на примере интеллектуальных электромеханических систем. В работе [21] рассматривается децентрализованная структура много-



агентной робототехнической системы с акцентом на сетевое взаимодействие между агентами.

Распределению задач в однородных группах роботов с предлагаемыми подходами и методами многоагентного управления посвящены работы [22–24]. Особенности формирования и распределения задач в однородных командах, состоящих из людей, исследовались в [25–27]. Однако недостаточно исследованным остается вопрос формирования смешанных команд из людей и коботов и распределения задач в них с учетом специфики этих двух типов участников и требований их безопасного взаимодействия.

Проблему формирования КРТС, в которых участвует множество коботов и людей, а также распределения и выполнения ее элементами задач, можно рассматривать в контексте так называемых многоагентных систем. Подобные системы представляют собой некоторое множество интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом, учитывая взаимное влияние друг на друга внешней среды и самих агентов [28, 29]. Ключевыми свойствами агентов являются целенаправленность и автономность принятия решений и действий, т.е. подобные агенты обладают чертой интеллектуальности (подробное описание понятия интеллектуального агента представлено в работах [5, 17, 30, 31]). Применение многоагентных робототехнических систем позволяет решать проблему распределения между агентами всего спектра задач и перераспределять (переназначать) их в зависимости от изменений среды функционирования, а также состояния и состава самой системы. В КРТС при взаимодействии интеллектуальных агентов необходимо учитывать такие аспекты, как общность цели, автономность агентов и согласованность действий агентов.

Аналогичными аспектами обладает команда при рассмотрении задач коллективного управления организационных систем [32]. Традиционно под командой понимают коллектив (объединение агентов, осуществляющих совместную деятельность и обладающих общими интересами), способный достигать цели автономно и согласованно, при минимальных управляющих воздействиях [33]. В рамках КРТС смешанная неоднородная команда состоит из людей и коботов, осуществляющих совместную согласованную деятельность.

На практике согласованность действий редко появляется сама по себе; достижение согласованности в действиях требует наличия управления. При этом команды, состоящие из людей, можно рассматривать как организационные системы, и для обеспечения требуемого поведения участников возможно применение обширного набора существующих способов управления (см., например, [33]). Команды, состо-

ящие только из коботов, можно рассматривать в качестве многоагентных систем [25, 34] или групп [35], способы и методы управления, которыми также хорошо исследованы [36–39].

Спецификой смешанных неоднородных команд является необходимость объединения в системе управления механизмов управления организационными и техническими системами. Одной из перспективных методологий, рассматривающих именно организационно-технические системы, является методология комплексной деятельности [40]. В то же время, последняя является по сути расширением теории управления организационными системами, и предлагаемые в её рамках модели и методы требуют адаптации к специфическим задачам для роботов (в частности, коллаборативным).

Согласно [26, 32, 41], жизненный цикл команды состоит из двух этапов — формирования и функционирования. По отношению к рассматриваемым КРТС этап формирования разделён на определение состава участников команды и её адаптацию к особенностям решаемой задачи. Этап функционирования рассматривается в рамках коллаборативного пространства, с учетом взаимодействия человека и кобота и требований безопасности коллаборации. Следует отметить, что проанализированные исследования сосредоточены в основном на изучении именно этапа функционирования КРТС [42–44]. Однако на практике часто требуется решать задачи, относящиеся к этапу формирования команды.

**4. Формирование смешанной неоднородной команды из людей и коботов и распределение работ между ее участниками.** Рассмотрим команду, членами которой являются множество людей  $H = \{h_i\}_{i=1}^n$ , где  $n$  – количество людей в команде и множество коллаборативных роботов  $B = \{b_j\}_{j=1}^m$ , где  $m$  – количество коботов. Предположим, что успешная деятельность команды требует осуществления множества различных видов работ  $U = \{u_k\}_{k=1}^q$ , где  $q$  – количество этих работ.

Допустим, что любой агент в составе смешанной команды КРТС обладает некоторой характеристикой с набором значений, отражающим эффективность выполнения определенных видов работ. Для человека эта характеристика может отражать его квалификацию для видов работ (производительность труда [33]), для кобота – предназначенность для выполнения этих работ с точки зрения технических возможностей и характеристик (например, точность позиционирования актуаторов, наличие определенных манипуляторов (захватов) и/или степеней свободы и т.д.). Эффективность выполнения  $k$ -ого вида работ

$i$ -м человеком и  $j$ -м коллаборативным роботом обозначим через  $r_{h_i}^k \geq 0$  и  $r_{b_j}^k \geq 0$  соответственно. Характеристики  $r_{h_i}^k$  и  $r_{b_j}^k$  являются безразмерными, а их величины можно представить в виде неотрицательных вещественных чисел ( $r_{h_i}^k, r_{b_j}^k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ ).

Предположим, что требуемые к выполнению полный объем работ задан вектором  $V = (V^1, \dots, V^q), V^k \geq 0, k \in [1, q]$ . Теперь введем дополнительную характеристику участников команды – затраты на выполнение определенного вида работ, зависящие от объема этих работ  $x$  и эффективности конкретного члена команды  $r$ , т.е. определяемые функцией затрат с двумя переменными:  $c_i(x_{h_i}, r_{h_i})$  и  $c_j(x_{b_j}, r_{b_j})$ ,

$x_{h_i} = (x_{h_i}^1, x_{h_i}^2, \dots, x_{h_i}^q)$ ,  $x_{b_j} = (x_{b_j}^1, x_{b_j}^2, \dots, x_{b_j}^q)$  для людей и роботов соответственно. В общем случае функции затрат относятся к производственным функциям, однако для определения конкретного вида функции отдельно для людей и роботов определим суть самих затрат, которые понесут участники команды при выполнении определенного объема работ конкретного вида.

С одной стороны, за затраты можно считать денежные средства, требуемые на привлечение и удержание/задействование агента в команде. Так, для людей затратами будет являться выплачиваемая им заработная плата, для роботов – затраты на эксплуатацию и обслуживание (амортизационные расходы для упрощения не учитываем). В этом случае при увеличении объема работ для человека потребуется не только увеличивать его заработную плату, но и выплачивать дополнительные денежные средства для удержания в команде, отдельно оплачивать его работу в нерабочие дни, после окончания рабочего времени в рабочие дни и т.д. Кроме того, при увеличении объема работ, назначаемого человеку, его эффективность неизбежно начнет снижаться, в том числе до значения, близкого к нулю, например, в случае перенапряжения. Вместе с тем, затраты на робота будут расти пропорционально количеству работ определенного типа или общего количества всех назначенных работ всех видов (в случае ненулевой эффективности для всех указываемых видов работ, без учета сценариев с его поломкой и оплаты стоимости ремонта).

С другой стороны, затраты в общем виде могут отражать и время, необходимое для выполнения работ. Аналогично первому случаю, в случае перенапряжения, отсутствия или недостатка полноценного отдыха человек будет терять эффективность с течением времени (в конечном счете – до нулевого значения). Робот же может функциони-

ровать круглосуточно, а время на выполнение определенной работы не зависит от продолжительности его непрерывного функционирования.

Таким образом, можно предположить, что в случае увеличения объема работ для человека его затраты будут увеличиваться нелинейно, а для робота – линейно, поэтому возьмем линейную функцию для определения затрат робота. В качестве функции затрат людей для упрощения создаваемой модели будем использовать квадратичную производственную функцию Кобба-Дугласа, которая для  $i$ -го агента, выполняющего  $k$ -ый вид работ с эффективностью  $r_{h_i}$ , примет вид

$$c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q \left( \frac{(x_{h_i}^k)^2}{2r_{h_i}^k} \right). \text{ Следует отметить, что также существуют и}$$

другие производственные функции (функции затрат), например, обобщенная функция Кобба-Дугласа, функция с постоянной эластичностью замещения (функция Солоу), производственная функция Леонтьева и др. Таким образом, выпуклость функции затрат для человека будет означать убывающую отдачу от него при наращивании объема назначаемой ему работы  $k$ -го вида и неизменности значения эффективности выполнения им этого вида работ, а у робота в этих же условиях отдача будет пропорционально возрастать [41].

Для всех участников в команде считаем, что  $c_i(\cdot, \cdot)$  и  $c_j(\cdot, \cdot)$  неотрицательны, монотонно возрастают и невогнуты по первому аргументу, монотонно убывают по второму, а также  $c_i(0, \cdot) = c_j(0, \cdot) = 0$ .

Содержательно монотонность отражает рост затрат при увеличении объема выполняемых работ (первый аргумент). При этом, чем выше эффективность (второй аргумент), тем затраты ниже. Невогнутость отражает тот факт, что затраты возрастают как минимум линейно (обычно, для роботов), а в случае выпуклой функции затрат — тем быстрее, чем больший объем работ назначен члену команды (эффект усталости).

Определим следующие условия:

- любой член команды может выполнить любой неотрицательный объем работ каждого вида;
- функции затрат аддитивны (т.е. не учитывается дополнительность затрат по различным видам работ [41]).

При выполнении данных условий оптимальное распределение работ между членами команды можно найти, решив следующую задачу:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) + \sum_{j=1}^m c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) \rightarrow \min_{\{x_{h_i}^k \geq 0, x_{b_j}^k \geq 0, k=1, \dots, q\}}, \\ \sum_{i=1}^n x_{h_i}^k + \sum_{j=1}^m x_{b_j}^k = V^k, k \in [1, q]. \end{cases} \quad (1)$$

Если функции затрат членов команды являются функциями

Кобба-Дугласа (т. е.  $c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q r_{h_i}^k \varphi\left(\frac{x_{h_i}^k}{r_{h_i}^k}\right)$ ,  $c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) = \sum_{k=1}^q r_{b_j}^k \varphi\left(\frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}\right)$ ,  $i \in [1, n], j \in [1, m], \varphi(\cdot)$  — возрастающая выпуклая

гладкая функция,  $\varphi(0) = 0$ , то решение задачи (1) будет соответствовать решению задачи оптимального распределения работ между членами однородной команды, представленному в [41]. В то же время, специфика смешанной команды, включающей два вида членов различной природы, требует рассмотрения постановок задач со следующими расширениями и ограничениями:

1. Разные виды функций затрат для разных видов членов команды — людей и роботов.
2. Ограниченная активность роботов в команде (в выполнении работ каждого вида обязательно должен участвовать хотя бы один человек\*).
3. Зависимость затрат роботов на выполнение некоторого вида работ от количества людей, назначенных на выполнение того же вида работ.
4. Неаддитивность функций затрат у одного вида членов команды или у обоих сразу.

Рассмотрим ниже несколько постановок таких задач с различными ограничениями и приведём ряд примеров решения задачи оптимизации.

**4.1. Постановка и решение задачи в случае различных функций затрат у разных видов участников.** Пусть функции затрат членов команды — роботов и людей соответственно — имеют вид:

---

\* данное условие соответствует принципам взаимодействия человека и коллаборативного робота в рамках КРТС.

$$c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) = \sum_{k=1}^q \frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}, j \in [1, m]; \quad (2)$$

$$c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q r_{h_i}^k \varphi\left(\frac{x_{h_i}^k}{r_{h_i}^k}\right), i \in [1, n], \quad (3)$$

где  $\varphi(\cdot)$  — возрастающая выпуклая гладкая функция,  $\varphi(0) = 0$ .

Предположим, что функции затрат аддитивны. Рассмотрим последовательно несколько случаев задачи формирования команды, при которых:

1. Некоторый объём работ единственного вида распределяется между двумя участниками команды, один из которых является человеком, а другой — коллаборативным роботом ( $q = 1, n = 1, m = 1$ );

2. Объёмы работ различных видов в количестве  $q$  распределяются между участниками команды составом, аналогичным п. 1 ( $q \in \mathbb{N}, q < \infty, n = 1, m = 1$ ).

3. Объём работ единственного вида распределяется между  $n$  людьми и  $m$  коботами ( $q = 1, n, m \in \mathbb{N}, n < \infty, m < \infty$ ).

4. Объёмы работ различных видов в количестве  $q$  распределяются между  $n$  людьми и  $m$  коботами ( $q, n, m \in \mathbb{N}, q < \infty, n < \infty, m < \infty$ ).

Рассмотрим вначале задачу 1 и решим её в дискретном виде. Предположим, что объём работ включает в себя  $V$  идентичных атомарных операций, т. е.  $x = \sum_{l=1}^V V_l$ . Тогда общие затраты системы на выполнение объёма работ  $x$  могут записываться как:

$$c_c(x_h, r_h, x_b, r_b) = c_h(x_h, r_h) + c_b(x_b, r_b), \text{ либо}$$

$$c_t(x_h, r_h, x_b, r_b) = \max\{c_h(x_h, r_h), c_b(x_b, r_b)\},$$

$$x_h = \sum_{h \in H} v_h, x_b = \sum_{b \in B} v_b, x = x_h + x_b,$$

где  $c_h(\cdot, \cdot)$  — функция затрат человека,  $c_b(\cdot, \cdot)$  — функция затрат кобота,  $x_h, x_b$  — объёмы работы, выполняемые человеком и коботом соответственно,  $H$  и  $B$  — некоторые множества индексов такие, что  $H \cup B = \{1, 2, \dots, V\}$ .

Функцию общих затрат  $c_c(x_h, r_h, x_b, r_b)$  следует использовать, когда затраты сепарабельны (например, издержки на оплату труда людей и содержание коботов). Если же требуется, например, проводить оптимизацию по времени выполнения всего пула работ, тогда следует пользоваться функцией  $c_t(x_h, r_h, x_b, r_b)$ . Далее в тех случаях, когда вид функции затрат неважен, будем пользоваться записью  $c(x_h, r_h, x_b, r_b)$ .

Задача оптимального распределения работ заключается в нахождении значений  $x_h = x_h^* \geq 0, x_b = x_b^* \geq 0$ , минимизирующих значение функции общих затрат, то есть:

$$c^*(x_h^*, r_h, x_b^*, r_b) = \underset{\substack{x_h \geq 0, x_b \geq 0, \\ x = x_h + x_b}}{\text{Arg min}}(c(x_h, r_h, x_b, r_b)).$$

Для решения этой задачи можно использовать следующий алгоритм. Предположим, что для объёма работ  $x^{V-1} = \sum_{l=1}^{V-1} v_l$  нам известны минимизирующие затраты  $x_h^{V-1} = \sum_{h \in H} v_h, x_b^{V-1} = \sum_{b \in B} v_b, x^{V-1} = x_h^{V-1} + x_b^{V-1}$ ,  $H \cup B = \{1, 2, \dots, V-1\}$ , а величина минимальных затрат равна, в зависимости от типа затрат:

$$c_c^{V-1} = c_c(x_h^{V-1}, r_h, x_b^{V-1}, r_b) = c_h(x_h^{V-1}, r_h) + c_b(x_b^{V-1}, r_b), \text{ либо}$$

$$c_t^{V-1} = c_t(x_h^{V-1}, r_h, x_b^{V-1}, r_b) = \max\{c_h(x_h^{V-1}, r_h), c_b(x_b^{V-1}, r_b)\}.$$

Тогда величину минимальных общих затрат для объёма работ  $x^V = x^{V-1} + v_V$  можно определить следующим образом:

$$c_c^V = c_c(x_h^V, r_h, x_b^V, r_b) = c_c^{V-1}(x_h^{V-1}, r_h, x_b^{V-1}, r_b) + \\ + \min \left\{ \begin{array}{l} c_h(x_h^{V-1} + v_V, r_h) - c_h(x_h^{V-1}, r_h), \\ c_b(x_b^{V-1} + v_V, r_b) - c_b(x_b^{V-1}, r_b) \end{array} \right\}, \text{ либо}$$

$$c_t^V = c_t(x_h^V, r_h, x_b^V, r_b) = \min \left\{ \begin{array}{l} \max\{c_h(x_h^{V-1} + v_V, r_h), c_b(x_b^{V-1}, r_b)\}, \\ \max\{c_h(x_h^{V-1}, r_h), c_b(x_b^{V-1} + v_V, r_b)\} \end{array} \right\}.$$

Так как для выбранных функций затрат  $c_h(0, r_h) = c_b(0, r_b) = 0$ , то с помощью метода математической индукции можно убедиться, что значения минимальных общих затрат  $c_c^V$  и  $c_t^V$  могут быть найдены для любого  $V > 0$ . Отметим, что предложенный алгоритм применим на случай произвольного ограниченного числа участников смешанной команды, т. е. решает также и задачу 3.

Теперь рассмотрим задачу 2. Если функции затрат роботов и людей имеют вид (2) и (3) соответственно, то задачу можно решить следующим образом. Пусть распределяемые объёмы работ заданы вектором  $V = (V^1, \dots, V^q), V^k \geq 0, k \in [1, q]$ , т.е.  $k$ -й вид работ состоит из  $V^k \geq 0$  идентичных атомарных операций. При этом операции, составляющие различные виды работ, попарно различны и выполняются участниками команды в общем случае с разной эффективностью. Для каждого  $k = \overline{1, q}$  будем вычислять значения минимальных затрат системы на выполнение объёма работ  $V^k$ .

$$c_c^{V^k} = c_c(x_h^k, r_h^k, x_b^k, r_b^k) = c_h(x_h^k, r_h^k) + c_b(x_b^k, r_b^k), x_h^k + x_b^k = V^k.$$

Для этого необходимо вычислять значения  $x_h^k$  и  $x_b^k$ , что можно сделать по алгоритму решения задачи 1. Тогда минимальные затраты на выполнение всего объёма работ  $V$  будут равны  $c_c^V = \sum_{k=1}^q c_c^{V^k}$ . Задача 4 решается аналогично.

**4.2. Постановка и решение задачи в случае ограниченной активности членов команды.** Предположим, что функции затрат членов команды имеют вид (2) и (3) для роботов и людей соответственно. Введём следующее ограничение: каждый из заданных вектором  $V = (V^1, \dots, V^q), V^k \geq 0, k \in [1, q]$  объёмов работ должен выполняться как минимум двумя членами команды, один из которых обязательно является человеком.

Будем решать задачу (1) в непрерывном виде. Рассмотрим следующие частные случаи:

1. Один вид работ, один человек,  $m$  роботов.
2. Один вид работ,  $n$  людей,  $m$  роботов.
3.  $q$  видов работ, один человек,  $m$  роботов.
4.  $q$  видов работ,  $n$  людей,  $m$  роботов.

Рассмотрим случай 1. Пусть  $x_h$  — часть объёма работ, который мы должны распределить для выполнения человеком. Итоговое рас-



пределение всего объёма работ  $V$  между членами команды должно минимизировать затраты на его выполнение, а объём заранее неизвестен.

Добиться этого можно, минимизируя приращение затрат при приращении объёма работ. Поскольку функции затрат роботов  $c_j(x, r_{b_j})$  линейны, то для обеспечения минимума затрат требуется выбрать робота  $j$ , выполняющего данный вид работ с максимальной эффективностью, и назначить ему часть объёма работ в размере  $V - x_h$ .

Найдём теперь  $x_h$ . Заметим, что поскольку  $c_i(x, r_h)$  — выпуклая функция, то  $\forall j \in [1, m] \exists x_j^0 : \forall x > x_j^0 \ c_i(x, r_h) > c_j(x, r_{b_j})$ . В силу непрерывной дифференцируемости функции  $c_i(x, r_h)$  если  $\exists x_E > 0 : c_i(x, r_h) = c_j(x, r_{b_j})$ , то  $\exists x_h \in (0, x_E) : c'_i(x_h, r_h) = c'_j(x_h, r_{b_j}) = \frac{1}{r_{b_j}}$ .

Это и будет искомая часть объёма работ. Следует отметить, что в случае  $c_i(x, r_h) > c_j(x, r_{b_j}) \ \forall x > 0$  оптимального решения не существует.

Предложенный алгоритм применим на случай произвольного ограниченного числа участников смешанной команды, т.е. решает также и задачу 3.

Рассмотрим случай 2. Алгоритм решения тот же, но теперь необходимо искать вектор  $\{x_{h_1}, \dots, x_{h_n}\} : \forall i \in [1, n] \ c'_i(x_{h_i}, r_{h_i}) \leq \frac{1}{r_{b_j}}$ . Если

$$\sum_{i=1}^n x_{h_i} \leq V, \text{ то решение для каждого из членов команды – людей можно}$$

найти по алгоритму для случая 1. Если же  $\sum_{i=1}^n x_{h_i} > V$ , то распределение работ должно удовлетворять следующему условию:

$$c'_1(x_{h_1}, r_{h_1}) = c'_2(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c'_n(x_{h_n}, r_{h_n}) \leq c'_j(x_h, r_{b_j}) = \frac{1}{r_{b_j}}$$

Задача 4 решается аналогично.

**4.3. Постановка и решение задачи в случае зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот вид работ участников другого типа.** Рассмотрим задачу о формировании смешанной неоднородной команды для случая, когда эффективность роботов зависят от числа людей, выполняющих этот же

вид работ. Действующие требования к безопасности коллаборативных робототехнических систем требуют выбора траекторий движения, исключающих причинение травм человеку. В связи с этим разумным является предположение о том, что чем больше в рабочей зоне людей, тем более сложные траектории придётся использовать — таким образом, эффективность будет снижаться. Кроме того, в этом случае функция затрат для коботов будет также зависеть еще и от количества людей с ненулевой эффективностью выполнения работ, т.е.  $c_{b_j} = f(x_{b_j}, r_{b_j}, N_k)$ .

Рассмотрим случай с линейным падением эффективности. Пусть функции затрат членов команды — коботов имеют вид:

$$c_{b_j}(x_{b_j}, r_{b_j}, N_k) = \sum_{k=1}^q (1+N_k) \frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}, j \in [1, m]. \quad (4)$$

Здесь  $N_k$  — число людей, которым распределён ненулевой объём работ вида  $k$ . Функции затрат людей имеют вид (3). Как и ранее, все затраты считаем аддитивными по видам работ.

Будем решать задачу (1) в непрерывном виде. Рассмотрим следующие частные случаи:

1. Один вид работ,  $n$  людей, один кобот.
2.  $q$  видов работ,  $n$  людей, один кобот.

Отметим, что при подобной постановке задачи достаточно рассмотреть решения для единственного коллаборативного робота, так как их функции затрат линейны.

Рассмотрим случай, когда требуется распределить между участниками команды объёмы работ одного вида. Вначале заметим, что при  $V \rightarrow +\infty$  нет никакого смысла включать в команду более одного человека. Действительно, при увеличении  $N_k$  увеличивается также и производная функции затрат (4) — следовательно, при достаточно большом  $V$  более быстрый рост затрат перекроет выгоду от распределения части объёма работ на людей, чьи функции затрат выпуклы и растут при небольших значениях  $x_{h_i}$  медленнее, чем у кобота (см. также предыдущий параграф).

С другой стороны, при фиксированном объёме работ и достаточном количестве людей может получиться так, что:

$$\exists \{x_{h_1}, x_{h_2}, \dots, x_{h_n}\} : \sum_{i=1}^n x_{h_i} = V,$$

$$c'_{h_1}(x_{h_1}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c'_{h_n}(x_{h_n}, r_{h_n}) \leq c'_b(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}.$$

В этом случае очевидно, что включать в команду робота нецелесообразно, и весь объём работ следует поделить между людьми.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда  $V = const < +\infty$ , а количество людей  $n$  имеет такое значение, что:

$$\forall \{x_{h_1}, x_{h_2}, \dots, x_{h_n}\} : \sum_{i=1}^n x_{h_i} = V,$$

$$c'_{h_1}(x_{h_1}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c'_{h_n}(x_{h_n}, r_{h_n}) > c'_b(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}.$$

Вначале посчитаем издержки для смешанной команды из одного человека и одного робота. В общем случае, выберем условную норму людей таким образом, чтобы их эффективность не росла с увеличением номера, то есть  $r_{h_1} \geq r_{h_2} \geq \dots \geq r_{h_n}$ . Также будем считать, что  $\forall i \in \{1, \dots, n\} \exists x^{(i)} > 0 : \forall 0 \leq x \leq x^{(i)} \quad c_{h_i}(x, r_{h_i}) \leq c_b(x, r_b, i)$ .

Тогда  $\exists x_{h_1}^{(1)} : c'_{h_1}(x_{h_1}^{(1)}, r_{h_1}) = c'_b(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}$ .

$$c^{(1)} = r_{h_1} \varphi \left( \frac{x_{h_1}^{(1)}}{r_{h_1}} \right) + 2 \frac{V - x_{h_1}^{(1)}}{r_b}.$$

При добавлении в команду ещё одного человека возможны два варианта:

$$1) \exists x_{h_1}^{(2)}, x_{h_2}^{(2)} : x_{h_1}^{(2)} + x_{h_2}^{(2)} = V, c'_{h_1}(x_{h_1}^{(2)}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}^{(2)}, r_{h_2}) \leq c'_b(r_b, 2) = \frac{3}{r_b}.$$

$$2) \exists x_{h_1}^{(2)}, x_{h_2}^{(2)} : x_{h_1}^{(2)} + x_{h_2}^{(2)} < V, c'_{h_1}(x_{h_1}^{(2)}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}^{(2)}, r_{h_2}) = c'_b(r_b, 2) = \frac{3}{r_b}.$$

Первый вариант соответствует случаю, когда минимум затрат достигается при распределении всего объёма работы среди людей, без задействования робота. Рассмотрим второй вариант. Заметим, что в силу выпуклости функции затрат  $c_1(x, r_{h_1}), x_{h_1}^{(2)} > x_{h_1}^{(1)}$ . Обозначим  $\Delta^{(1)} = x_{h_1}^{(2)} - x_{h_1}^{(1)}$ . Теперь рассчитаем величину затрат для этого случая:

$$c^{(2)} = r_{h_1} \varphi \left( \frac{x_{h_1}^{(1)} + \Delta^{(1)}}{r_{h_1}} \right) + r_{h_2} \varphi \left( \frac{x_{h_2}^{(2)}}{r_{h_2}} \right) + 3 \frac{V - x_{h_1}^{(1)} - \Delta^{(1)} - x_{h_2}^{(2)}}{r_b}.$$

В общем случае о том, в каком отношении находятся  $c^{(1)}$  и  $c^{(2)}$ , ничего сказать нельзя. Авторам не удалось найти точного решения этой задачи даже для случая  $r_{h_1} = r_{h_2} = r_h$ , то есть, когда все люди выполняют работу с одинаковой эффективностью. По всей видимости, для решения практических задач в такой постановке потребуется использовать некоторые эвристические подходы. Разработка таких алгоритмов и методов является темой для дальнейшего исследования.

**5. Вычислительный эксперимент.** В среде MATLAB было проведено моделирование оптимального распределения работ между участниками КРТС для решения системы уравнений, представленной в (1). Для целей моделирования были внесены следующие ограничения и допущения:

1. В команде присутствует  $n \geq 1$  людей и  $m \geq 1$  роботов.
2. Количество типов работ для людей и роботов в команде является одинаковым и равно  $q > 1$ . Любой робот и человек в команде способен выполнять все  $q$  видов работ, но с разной эффективностью, задаваемой матрицами эффективности  $r_h = (r_{h_k i})_{q \times n}$ , и  $r_b = (r_{b_k j})_{q \times m}$  для людей и роботов соответственно.

3. Как было указано в главе 4, в качестве функций затрат людей были использованы квадратичные функции типа Кобба-Дугласа, суммируемые по всем  $q$  видам работ. Так, для  $i$ -го человека, выполняющего  $q$  видов работ с различными значениями эффективности

$$r_{h_i}^k \geq 0, k \in [1, q], \text{ данная функция примет вид: } c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q \left( \frac{(x_{h_i}^k)^2}{2r_{h_i}^k} \right),$$

$i \in [1, n], r_{h_i}^k \geq 0$ . В свою очередь, функция затрат для  $i$ -го робота, сумми-

руемая по всем  $q$  видам работ, полагаются линейными:  $c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) =$   
 $= \sum_{k=1}^q \left( \frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k} \right), j \in [1, m], r_{b_j}^k \geq 0.$

4. Любой участник команды способен выполнять любой из доступных ему  $q$  видов работ, если его эффективность для этого вида работ не равна нулю.

5. Общее количество затрат людей и роботов соответственно для  $-го$  вида работ равно общему объему для этого вида работ

$V^k : \sum_{i=1}^n x_{h_i}^k + \sum_{j=1}^m x_{b_j}^k = V^k, k \in [1, q].$  Общие объемы для любых видов работ

одинаковы, но значения объемов работ для людей  $V_h^k = \sum_{i=1}^n x_{h_i}^k$  и

роботов  $V_b^k = \sum_{j=1}^m x_{b_j}^k$  могут различаться. Общий объем работ для всех  $q$

видов работ представляет собой матрицу  $V = (V_{k d})_{q \times l}$ , где  $l$  – количество типов участников ( $l = 2$  для команды из роботов и людей).

Для процесса моделирования было принято к рассмотрению пять сценариев, расположенных в порядке усложнения исходных данных и начальных условий:

1. Одинаковые фиксированные объемы работ для всех  $q$  видов работ для людей и роботов, любой участник команды может выполнять любое количество работ, количество людей и роботов одинаковое, значения матрицы эффективности для людей и роботов задаются случайным образом в диапазоне  $(0..1]$ .

2. Одинаковые фиксированные объемы работ для всех  $q$  видов работ для людей и роботов, любой участник команды может выполнять любое количество работ, количество людей и роботов неодинаковое, значения матрицы эффективности для людей и роботов задаются случайным образом в диапазоне  $(0..1]$ .

3. Неодинаковые фиксированные объемы работ для всех  $q$  видов работ для людей и роботов, любой участник команды может выполнять любое количество работ, количество людей и роботов неодинаковое, значения матрицы эффективности для людей и роботов задаются случайным образом в диапазоне  $(0..1]$ .

4. Одинаковые фиксированные объемы работ для всех  $q$  видов работ для людей и роботов, любой участник команды может выполнять только одну работу, количество людей и роботов одинаковое,

значения матрицы эффективности для людей и роботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

5. Неодинаковые фиксированные объемы работ для всех  $q$  видов работ для людей и роботов, любой участник команды может выполнять только одну работу, количество людей и роботов неодинаковое, значения матрицы эффективности для людей и роботов задаются случайным образом, но значения эффективности для роботов – в несколько раз выше, чем у людей; значения матрицы эффективности для людей и роботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

Вычисление значений, назначенных участникам команды объемов работ  $x_{h_i}^k$  и  $x_{b_j}^k$  осуществлялось в среде моделирования MATLAB с использованием функции `fmincon`. Значения по исходным характеристикам для команд представлены в таблице 1, вычисленные значения объемов работ участникам неоднородной смешанной команды – в таблице 2.

Таблица 1. Характеристики команд.

Сценарий	Значение переменных						
	$n$	$m$	$q$	$V_h$	$V_b$	$r_h$	$r_b$
№ 1	3	3	3	100 100 100	100 100 100	0,08 0,24 0,12 0,05 0,9 0,95 0,9 0,37 0,11	0,18 0,24 0,42 0,49 0,49 0,34 0,78 0,39 0,24
№ 2	4	2	3	100 100 100	100 100 100	0,3 0,74 0,19 0,69 0,63 0,78 0,08 0,93 0,46 0,45 0,31 0,51	0,18 0,37 0,78 0,49 0,51 0,82
№ 3	4	2	3	60 100 70	50 100 20	0,58 0,23 0,46 0,97 0,62 0,68 0,4 0,37 0,8 0,1 0,26 0,34	0,52 0,23 0,04 0,89 0,14 0,72
№ 4	3	3	3	100 100 100	100 100 100	0,56 0 0 0 0,7 0 0 0 0,82	0,93 0 0 0 0,58 0 0 0 0,88
№ 5	2	4	3	50 90 30	50 100 60	1 0 0 0,87 0 0	0 2 0 0 0 0 2,61 0 3 0 0 2,52

Таблица 2. Результаты моделирования распределения объема работ в неоднородной смешанной команде.

Сценарий	Значение переменных					
	$x_h$			$x_b$		
№ 1	0,01	0,14	0,04	0	0	199,81
	0,01	1,66	1,82	196,52	0	0
	1,04	0,17	0,02	198,77	0	0
№ 2	0,24	1,5	0,1	1,28	0	196,88
	0,5	0,78	0,01	1,11	197,59	0
	0,23	0,24	0,11	0,32	0	199,09
№ 3	0,64	0,11	0,4	1,78	107,07	0
	0,44	0,52	0,18	1,15	0	198,71
	0,88	0,01	0,1	0,16	0	88,86
№ 4	0,34	0	0	199,66	0	0
	0	0,83	0	0	199,17	0
	0	0	0,76	0	0	199,24
№ 5	0,49	0	0	0	99,51	0
	0	0,29	0	0	0	189,71
	0	0	0	90	0	0

**5.1. Анализ полученных результатов и формирование состава КРТС.** Согласно расчетам, представленным в таблице 2, во всех сценариях коботам назначался больший объем работ, чем людям. Это связано с отличиями в типах функций затрат двух типов участников – у коботов она принята линейной.

В сценариях 1-3 в результате минимизации функции основной объем работы назначался одному коботу с максимальной эффективностью среди этого типа участников для данного вида работ. Кроме того, среди людей в команде также была заметна неравномерность распределения назначаемых объемов работ, сильно зависящая от разницы значений эффективности по конкретному виду работ.

Результаты моделирования по сценариям 4-5, где любой участник команды может выполнять только одну работу (т.е. некоторые значения в матрицах эффективности для людей и коботов являются нулевыми), схожи с вычисленными значениями назначаемых объемов работ в сценариях 1-3: основной объем работ выполнял кобот, если его эффективность для данной работы была больше нуля. Несмотря на это, некоторый объем работ людям все же назначался, если значение его эффективности было ненулевое. Особо следует отметить, результаты моделирования по третьему виду работ сценария 5, где ненулевыми значениями эффективности среди всех участников обладали только два кобота. В результате кобот с наивысшим значением эффективно-

сти получил весь объем данной работы, хотя этот объем мог быть распределен между двумя роботами.

Особенностью полученных результатов моделирования является то, что вышеуказанные значения назначаемых объемов работ можно использовать не только на этапе первоначального распределения работ разных видов среди участников КРТС (в ходе первичной постановки задач на выполнение работ), но и, в первую очередь, осуществлять целенаправленный подбор состава команды для выполнения конкретных работ с учетом значений эффективности для каждого вида работ и всех агентов в команде. Кроме того, гибкость созданной модели позволяет перераспределять требуемый для выполнения объем работ среди участников при изменении состава команды (например, в случае выхода из строя кобота или неспособности человека делать конкретный вид работ) и/или значений эффективности для агентов в составе КРТС, в том числе с учетом уже сделанного объема работ конкретных видов.

**6. Заключение.** Актуальность настоящей работы заключается в недостаточной исследованности вопросов формирования смешанных неоднородных команд, состоящих из людей и коботов (т.е. гетерогенных групп из участников различных типов) и распределения задач в них с учетом специфики разнородности членов команды, а также обязательных требований безопасного взаимодействия участников, присутствующих в КРТС. Рассматриваются частные случаи задачи, в том числе при различных функциях затрат у разных видов участников, в случае ограниченной активности членов команды, при наличии зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот вид работ участников другого типа, а также в случае наличия произвольного количества видов работ, назначаемых участникам смешанной неоднородной команды.

В ходе моделирования людям в КРТС назначался сравнительно малый объем работы, в то время как коботы выполняли ее основную часть. Это связано как различиями в используемых функциях затрат, так и с отсутствием в модели минимального значения объема работ, который может быть назначен участнику с ненулевым значением эффективности. Кроме того, актуальной является задача более равномерного распределения объемов работ среди участников одного типа.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости введения в модель дополнительных условий и доработок. В частности, в результате моделирования определенный объем работы не обязательно должен назначаться всем участникам. Вместо этого планируется программно реализовать процедуру выбора определенного состава



участника из числа доступных (в том числе на основании более высоких значений эффективности выполнения конкретных видов работ) с обязательным соблюдением требования наличия в составе исполнителей для каждого вида работ не менее одного кобота и не менее одного человека (для сохранения самой сути КРТС как комплексной системы взаимодействия людей и роботов). Также планируется добавить временную составляющую затрат на выполнение работ участниками команды и реализовать изменение величины эффективности участников КРТС во времени, добавить возможность введения простоев в работе по конкретным участникам и моделировать отказы коботов и сопутствующие им снижение эффективности, связанное с затратами на проведение ремонта (учет фактора надежности робототехнических систем), а также предусмотреть возможность распределения объемов работ в случае зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот же вид работ агентов другого типа. Кроме того, требуется внедрение в модель функции дохода агентов, т.е. пользы (награды), получаемой агентами при выполнении работ, в том числе в условиях нарастания получаемой агентами выгоды с увеличением объема выполненных работ.

Введение соответствующих дополнений и условий в модель и проведение расчетов будет являться предметом дальнейших исследований по тематике распределения задач в неоднородных смешанных командах в КРТС.

### Литература

1. Anandan T. Safety and control in collaborative robotics. Published on: Aug. 2013. vol. 6. pp. 1-4.
2. Ермишин К.В., Ющенко А.С. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники / Ермишин К.В., Ющенко А.С. // Робототехника и техническая кибернетика. №3 (12). Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2016. С. 3-9.
3. Galin. R., Meshcheryakov R. (2021) Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies,. Springer, Singapore. vol. 187.
4. Galin R., Meshcheryakov R., Kamesheva S. (2020) Distributing Tasks in Multi-agent Robotic System for Human-Robot Interaction Applications. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2020. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 12336.
5. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. URL: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (Дата обращения 20.08.2021).
6. Лопота А.В. Программы развития робототехники / Лопота А.В., Спасский Б.А // Робототехника и техническая кибернетика. Т. 9. № 1. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2021. С. 5-16.

7. Ермолов И.Л. Стратегические вопросы развития российской робототехники // *Инновации*. 2020. №. 2. С. 43-46.
8. Mihelj M. et al. (2019) Collaborative Robots. In: *Robotics*. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4\_12.
9. Саламатов Ю.П. Система законов развития техники (Основы теории развития Технических систем). Institute of Innovative Design. Красноярск. 1996.
10. ГОСТ Р ИСО 8373-2014. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения (2014) // Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Москва: Стандартинформ.
11. Юревич Е.П. Функциональные схемы роботов трех поколений. Изв. АН СССР. *Техническая кибернетика*. 1974. № 6.
12. Ющенко А.С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18. №. 12. С. 812-819.
13. Franklin C.S. et al. Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace. In: *Journal of Safety Research*. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands (2020). vol. 73. pp. 1-8.
14. Konz S. *Work design: industrial ergonomics*. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons. Inc. 1990.
15. Galin R., Meshcheryakov R. (2020) Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*. Studies in Systems, Decision and Control, Springer, Cham. vol 272.
16. Wooldridge M., Jennings N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. *Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages* (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994). Ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin: Springer Verlag. 1995. pp. 1-22.
17. Wooldridge M., Jennings N. *Intelligent Agents: Theory and Practice*. The Knowledge Engineering Review. 1995. vol. 10. № 2. pp. 115-152.
18. Тимофеев А.В. Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // *Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий*. СПб.: СПИИРАН. 1999. С. 71-81.
19. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. (2018) Multi-agent Robotic Systems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics*. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 11097.
20. Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г. Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // *Вестник ЮНЦ РАН*. Т. 1. (2). 2005. С. 20-27.
21. Beer M. *Organization Change and Development: A System View*. London: Scott-Glenview: Foresman & Co. 1980.
22. Новиков Д.А. *Теория управления организационными системами*. 3-е изд. М.: Издательство физико-математической литературы. 2012. 604 с.
23. Тарасов В.Б. *От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика*. М.: Эдиториал УРСС. 2002.
24. Kotenko I., Ulanov A. Agent-based simulation of DDOS attacks and defense mechanisms. *Journal of Computing*. 2005. vol. 4. № 2.
25. Ren W. Consensus seeking, formation keeping and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control. Brigham: Brigham University. 2004.
26. Hilmi I., Sariff N. *A Survey and Analysis of Cooperative Multi-Agent Robot Systems: Challenges and Directions*. Applications of Mobile Robots. 2019.

27. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. Монография. 2009.
28. Darintsev O., Yudinsev B., Alekseev A., Bogdanov D., Migranov A. Methods of a Heterogeneous Multi-agent Robotic System Group Control, *Procedia Computer Science*. 2019. vol. 150. pp. 687-694.
29. Lavendelis E. et al. Multi-agent robotic system architecture for effective task allocation and management. Recent Researches in Communications, Electronics, Signal Processing & Automatic. 2012. pp. 22-24.
30. ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”.
31. Белов М.В., Новиков Д.А. Методология комплексной деятельности. М.: Ленанд, 2018. 320 с.
32. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. М.: Издательство физико-математической литературы. 2008. 184 с.
33. Бронштейн М. Управление командами для «чайников». М.: Вильямс. 2004.
34. Ющенко А.С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2019. Т. 7. № 2. С. 85-93.
35. Malik A., Bilberg A. (2019), Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly. *Industrial Robot*. vol. 46. №. 4, pp. 471-480.
36. Wang W., Li R., Diekel Z. et al. Robot action planning by online optimization in human-robot collaborative tasks. *Int J Intell Robot Appl* 2. 2018. pp. 161–179.
37. Галин Р.Р., Серебрянный В.В., Тевяшов Г.К., Широкий А.А. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. № 24(4). С.180-199.
38. Shi P., Yan B. A Survey on Intelligent Control for Multiagent Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. Jan. 2021. vol. 51. № 1. pp. 161-175.
39. Nazarova A., Zhai M. (2019) Distributed Solution of Problems in Multi Agent Robotic Systems. In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) *Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. vol. 174.
40. Jiménez A., García-Díaz V., Bolaños S. A Decentralized Framework for Multi-Agent Robotic Systems. *Sensors*. 2018. №18. P. 417.
41. Иванов Д.Я. Распределение ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях на основе роевого взаимодействия // *Управление большими системами: сборник трудов*. 2019. №. 78.
42. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Информатика и автоматизация*. 2018. Т. 5. №. 60. С. 39-63.
43. Лохин В.М., Манько С.В., Александрова Р.И., Диане С.А., Панин А.С. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. 16(8). С. 545-555.
44. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. М.: Синтег. 2002.

**Галин Ринат Романович** — научный сотрудник, лаборатория киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: коллаборативная робототехника, технологии многоагентных систем, системный анализ, моделирование робототехнических систем. Число научных публикаций — 19. [rinat.r.galin@yandex.ru](mailto:rinat.r.galin@yandex.ru); Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +79957972772.

**Широкий Александр Александрович** — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: математическая статистика, теория вероятностей, применение математического моделирования в технических системах. Число научных публикаций — 28. shiroky@ipu.ru; Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +74951981720.

**Магид Евгений Аркадьевич** — заведующий лабораторией интеллектуальных робототехнических систем, Казанский федеральный университет. Область научных интересов: поисково-спасательная робототехника, мобильная робототехника, планирование пути, роботизированные команды, взаимодействие человека и робота. Число научных публикаций — 200. dr.e.magid@ieee.org; Кремлевская, 35, 420008, Казань, Россия; р.т.: +78432213433.

**Мещеряков Роман Валерьевич** — заведующий лабораторией киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: теория управления, методы и системы защиты информации, применение методов математического моделирования технических систем, системный анализ, моделирование формирования эмпирического знания. Число научных публикаций — 150. mrv@ieee.org; Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +74951981720.

**Мамченко Марк Владиславович** — научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: навигационные системы, групповое управление, управление беспилотными авиационными системами. Число научных публикаций — 28. markmamcha@gmail.com; Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +74951981720.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00331). Работа третьего автора выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

---

R. GALIN, A. SHIROKY, E. MAGID, R. MESHCHERYAKOV, M. МАМЧЕНКО  
**EFFECTIVE FUNCTIONING OF A MIXED HETEROGENEOUS  
TEAM IN A COLLABORATIVE ROBOTIC SYSTEM**

---

*Galin R., Shiroky A., Magid E., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System.*

**Abstract.** The study describes a collaborative robot (cobot) as one of the types of intelligent robotics and its distinctive features compared to other types of robots. The paper presents a collaborative robotic system as a single complex system in which actors of different types – cobots and human workers – perform collaborative actions to achieve a common goal. Elements of a collaborative robotic system, as well as processes and entities that directly influence it are represented. The key principles of Human-Robot Collaboration are described. A collaborative robotic system is analyzed both as a multi-agent system and as a mixed team, whose members are heterogeneous actors. The relevance of the work lies in a weak level of research on issues of formation of mixed teams of people and cobots and distribution of tasks in such teams, taking into account features of these two types of participants and requirements of their safe collaboration. This work focused on a formation of mixed teams of elements of a single complex human-cobot system, the distribution of tasks among the members of such teams, taking into account the need to minimize costs for its participants and the heterogeneity of the team. As part of the study, the problem of forming a mixed heterogeneous team of people and cobots, and distribution of work among its members, as well as the corresponding mathematical description are presented. Specific cases of the problem, including different cost functions of different types of participants, a limited activity of the team's members, the dependence of the cost function of the participants of one type on the number of participants of another type, as well as an arbitrary number of works assigned to the team's members are considered.

**Keywords:** collaborative robot, multi-agent system, mixed heterogeneous team, human-robot interaction.

---

**Galin Rinat** — Researcher, Laboratory of cyberphysical systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: collaborative robotics, technologies of multi-agent systems, system analysis, modeling of robotic systems. The number of publications — 19. [rinat.r.galin@yandex.ru](mailto:rinat.r.galin@yandex.ru); 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +79957972772.

**Shiroky Alexander** — Ph.D., Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: mathematical statistics, probability theory, application of mathematical modeling in technical systems. The number of publications — 28. [shiroky@ipu.ru](mailto:shiroky@ipu.ru); 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +74951981720.

**Magid Evgeni** — Head of laboratory of intelligent robotic systems, Kazan Federal University. Research interests: search and rescue robotics, mobile robotics, path planning, group interaction of robots, human-robot interaction. The number of publications — 200. [DR.E.MAGID@ieec.org](mailto:DR.E.MAGID@ieec.org); 35, Kremlevskaya, 420008, Kazan, Russia; office phone: +78432213433.

**Meshcheryakov Roman** — Head of laboratory of cyberphysical systems, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: control theory, methods and systems of information protection, application of methods of

mathematical modeling of technical systems, system analysis, modeling of empirical knowledge formation. The number of publications — 150. MRV@ieec.org; 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +74951981720.

**Mamchenko Mark** — Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: navigation systems, swarm behavior and management, control of unmanned aerial systems. The number of publications — 28. MARKMAMCHA@gmail.com; 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +74951981720.

**Acknowledgements.** The reported study was partially funded by RFBR according to the research project No. 19-08-00331. The third author acknowledges the support of the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program.

## References

1. Anandan T. Safety and control in collaborative robotics. Published on: Aug. 2013. vol. 6. pp. 1-4.
2. Ermishin K.V., Yushenko A.S. [Collaborative mobile robots – a new stage of development of service robotics]. Robototekhnika i tehničeskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. Saint-Petersburg: CNII RTK. 2016. vol. 3. № 12. pp. 3-9. (In Russ.).
3. Galin R., Meshcheryakov R. (2021) Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer, Singapore. vol. 187.
4. Galin R., Meshcheryakov R., Kamesheva S. (2020) Distributing Tasks in Multi-agent Robotic System for Human-Robot Interaction Applications. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2020. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 12336.
5. Robot or cobot: The five key differences. Available at: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (Accessed 20.08.2021).
6. Lopota A.V. [Programs of development of robotics] Robototekhnika i tehničeskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. Saint-Petersburg: CNII RTK. 2021. vol. 9. № 1. pp. 5-16. (In Russ.).
7. Ermolov I.L. [Strategic issues of the development of Russian robotics] Innovatsii [Innovations]. 2020. vol. 2. pp. 43-46. (In Russ.).
8. Mihelj M. et al. (2019) Collaborative Robots. In: Robotics. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4\_12.
9. Salamatov Yu.P. Sistema zakonov razvitiya tehniki [System of laws of technological development]. Krasnoyarsk: Institute of Innovative Design. 1996. P. 174 (In Russ.).
10. GOST R ISO 8373-2014. [Robots and robotic devices. Terms and definitions]. M.: Gosstandart Rossii. 2014. (In Russ.).
11. Yurevich E.P. [Functional schemes of three generations of robots]. Tehničeskaya kibernetika [Technical cybernetics]. 1974. vol. 6. pp. 51-55. (In Russ.).
12. Yushenko A.S. [Collaborative robotics: current state and new challenges]. Mehatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, management]. 2017. vol. 18. № 12. pp. 812-819. (In Russ.).
13. Franklin C. et al. Collaborative robotics: New era of human-robot cooperation in the workplace. In: Journal of Safety Research. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands. 2020. vol. 73. pp. 1-8.

14. Konz S. Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons. Inc. 1990.
15. Galin R., Meshcheryakov R. (2020) Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control, Springer, Cham. vol 272.
16. Wooldridge M., Jennings N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994. Ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin: Springer Verlag. 1995. pp. 1-22.
17. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review. 1995. Vol.10. №2. pp. 115-152.
18. Timofeev A.V. [Multi-agent and intelligent management of complex robotic systems]. Teoreticheskie osnovy i prikladnye zadachi intellektual'nyh informacionnyh tekhnologij [Theory and Applications of Intelligent Information Technologies] Saint-Petersburg: SRIIRAN. 1999. pp. 71-81. (In Russ.).
19. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. (2018) Multi-agent Robotic Systems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 11097.
20. Gaiyduk A.R., Kalyaev I.A., Kapustyan S.G. [Management of a group of intelligent objects based on swarm principles]. Vestnik YUNC RAN [Bulletin of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences]. 2005. vol. 1. № 2. pp. 20-27. (In Russ.).
21. Beer M. Organization Change and Development: A System View. London: Scott-Glenview: Foresman & Co. 1980.
22. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizacionnymi sistemami [Organizational systems management theory]. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury. 2012. P. 604. (In Russ.).
23. Tarasov V.B. Ot mnogoagentnyh sistem k intellektual'nym organizაციyam: filosofiya, psihologiya, informatika [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow: Editorial URSS. 2002. P. 352. (In Russ.).
24. Kotenko I., Ulanov A. Agent-based simulation of DDOS attacks and defense mechanisms. Journal of Computing. 2005. vol. 4. № 2.
25. Ren W. Consensus seeking, formation keeping and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control. Brigham: Brigham University. 2004.
26. Hilmi I., Sariff N. A Survey and Analysis of Cooperative Multi-Agent Robot Systems: Challenges and Directions. Applications of Mobile Robots. 2019.
27. Kalyaev I.A., Gaiyduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppah robotov [Models and algorithms for collective management in robotic groups]. Moscow: FIZMATLIT. 2009. P. 280. (In Russ.).
28. Darintsev O., Yudinsev B., Alekseev A., Bogdanov D., Migranov A. Methods of a Heterogeneous Multi-agent Robotic System Group Control, Procedia Computer Science. vol. 150. 2019. pp. 687-694.
29. Lavendelis E. et al. Multi-agent robotic system architecture for effective task allocation and management. Recent Researches in Communications, Electronics, Signal Processing & Automatic. 2012. pp. 22-24.
30. ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”.
31. Belov M.V., Novikov D.A. Metodologiya kompleksnoj deyatel'nosti [Methodology of complex activity]. Moscow: Lenand. 2018. P. 320. (In Russ.).

32. Novikov D.A. Matematicheskie modeli formirovaniya i funkcionirovaniya komand [Mathematical models of formation and operation of teams]. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury. 2008. P. 184. (In Russ.).
33. Bronshtein M. Upravlenie komandami dlya «chajnikov» [Teams management for dummies]. Moscow: Vilyams. 2004. P. 256. (In Russ.).
34. Yushenko A.S. [Ergonomic Problems of Collaborative Robotics]. Robototekhnika i tehniceskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. 2019. vol. 7. № 2. pp. 85-93. (In Russ.).
35. Malik A., Bilberg A. (2019), Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly. *Industrial Robot*. vol. 46. №. 4, pp. 471-480.
36. Wang W., Li R., Diekel Z. et al. Robot action planning by online optimization in human-robot collaborative tasks. *Int J Intell Robot Appl* 2. 2018. pp. 161–179.
37. Galin R.R., Serebrennii V.V., Tevyashov G.K., Shirokiy A.A. [Human-robot interaction in collaborative robotic systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Southwest State University]. 2020. vol. 24. № 4. pp.180-199. (In Russ.).
38. Shi P., Yan B. A Survey on Intelligent Control for Multiagent Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. Jan. 2021. vol. 51. № 1. pp. 161-175.
39. Nazarova A., Zhai M. (2019) Distributed Solution of Problems in Multi Agent Robotic Systems. In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) *Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. vol 174.
40. Jiménez A., García-Díaz V., Bolaños S. A Decentralized Framework for Multi-Agent Robotic Systems. *Sensors*. 2018. №18. P. 417.
41. Ivanov D.Ya. [Distribution of roles in robot coalitions with limited swarm-based communication]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Large-Scale Systems Control: Proceedings]. 2019. vol. 78. pp. 23-45. (In Russ.).
42. Pshihopov V.H., Medvedev M.Yu. [Group Management of Mobile Robot Movement in an Uncertain Environment using Unstable Modes]. *Informatika i avtomatizaciya* [Computer Sciences and Automation]. 2018. vol. 5. № 60. pp. 39-63. (In Russ.).
43. Lohin V.M., Man'ko S.V., Aleksandrova R.I., Diane S.A., Panin A.S. [Mechanisms of intelligent feedback, knowledge processing and self-learning in autonomous robot management systems and multi-agent robotic groups]. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie* [Mechatronics, automation, management]. 2015. vol. 16(8). pp. 545-555. (In Russ.).
44. Gubko M.V., Novikov D.A. *Teoriya igr v upravlenii organizacionnymi sistemami* [Game Theory in the Management of Organizational Systems]. Moscow: Sinteg. 2002. P. 138. (In Russ.).



## Е.Ю. ШМАЛЬКО, Ю.А. РУМЯНЦЕВ, Р.Р. БАЙНАЗАРОВ, К.Л. ЯМШАНОВ ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ РОБОТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Шмалько Е.Ю., Румянцев Ю.А., Байназаров Р.Р., Ямшанов К.Л. Идентификация нейросетевой модели робота для решения задачи оптимального управления.*

**Аннотация.** Для расчета оптимального управления требуется достоверная математическая модель объекта управления. В дальнейшем при реализации расчетных управлений на реальном объекте эта же модель может быть использована в навигации робота для прогнозирования его положения и корректировки показаний сенсоров, поэтому важно, чтобы модель достаточно адекватно отражала динамику объекта. Вывод модели часто требует значительного времени и иногда даже невозможен с использованием традиционных методов. Ввиду все большего разнообразия и чрезвычайно сложной природы объектов управления, включая разнообразие современных робототехнических систем, все большую актуальность приобретает задача идентификации, которая позволяет построить математическую модель объекта управления, имея входные и выходные данные о системе. Идентификация нелинейной системы представляет особый интерес, так как большинство реальных систем имеют нелинейную динамику. И если раньше идентификация модели системы заключалась в подборе оптимальных параметров для выбранной структуры, то появление современных методов машинного обучения открывает более широкие перспективы и позволяет автоматизировать сам процесс идентификации. В настоящей работе в качестве объекта управления рассматривается колесный робот с дифференциальным приводом в симуляционной среде Gazebo, которая на сегодняшний день является наиболее популярным программным пакетом при разработке и моделировании робототехнических систем. Математическая модель робота заранее неизвестна. Основная проблема заключается в том, что существующие математические модели не соответствуют реальной динамике робота в симуляторе. В работе рассматривается решение задачи идентификации математической модели объекта управления с помощью машинного обучения на основе нейронной сети. Представлен новый смешанный подход, основанный на использовании известных простых моделей объектов и идентификации неучтенных динамических свойств объекта с помощью нейронной сети на основе обучающей выборки. Для формирования обучающих данных был написан программный пакет, автоматизирующий процесс сбора с помощью двух ROS-узлов. Для обучения нейросети использовался фреймворк PyTorch и был создан программный пакет с открытым исходным кодом. Далее идентифицированная модель объекта используется для расчета оптимального управления. Результаты вычислительного эксперимента демонстрируют адекватность и работоспособность полученной модели. Представленный подход на основе комбинации известной математической модели и дополнительной идентифицированной нейросетевой модели позволяет использовать преимущества накопленного физико-математического аппарата и повысить его эффективность и точность за счет использования современных средств машинного обучения.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, идентификация, нейронная сеть, Gazebo, дифференциальный робот.

**1. Введение.** Расчет оптимального управления известными методами осуществляется на основе математической модели объекта в

пространстве состояний, представленной, как правило, в виде системы дифференциальных уравнений.

Традиционно динамические модели, описывающие интересующую систему, выводятся с использованием основных физико-математических законов [1]. В этом случае получение математической модели объекта управления - сложный процесс, требующий подробных специальных знаний об объекте управления. Разработка таких моделей может быть очень трудоемкой и, следовательно, дорогостоящей. Современное бурное развитие робототехники требует быстрых, универсальных и автоматических подходов к определению моделей объектов.

Современный альтернативный способ получения модели объекта - это ее идентификация, установление тождественности известному объекту. В задаче идентификации математическая модель объекта управления не известна полностью или частично, но исследователь имеет реальный объект управления или его симулятор [2]. Необходимо найти неизвестную многомерную функцию, описывающую динамику объекта. Пространство входных векторов этой функции есть пространство допустимых управлений для этого объекта.

Важным шагом в идентификации системы является определение типа используемой модели, поскольку в подавляющем большинстве методов реализуется так называемая параметрическая идентификация [3, 4]. Сначала выбирается определенная структура модели, которая считается подходящей для описания данного объекта. Далее проводится идентификационный эксперимент, в котором измеряются входные и выходные сигналы, а затем метод идентификации реализует настройку параметров модели в соответствии с некоторыми адаптивными законами, чтобы реакция модели на входной сигнал могла приблизительно соответствовать отклику реальной системы к тому же входному воздействию. Чаще всего используют идентификацию объектов с помощью линейных систем [5, 6], поскольку для них легко определить влияние различных входных сигналов на выход. Хотя линейные модели привлекательны по многим причинам, но они имеют существенные ограничения. В настоящее время возрос значительный интерес к методам идентификации нелинейных систем [7–9], с помощью методов машинного обучения на основе нейронных сетей [10–12] и методов символьной регрессии [13]. Они позволяют реализовывать не только параметрическую, но и структурную идентификацию систем [14].

Нейронные сети, являясь универсальным аппроксиматором, представляют мощный инструмент для идентификации нелинейных систем. В виду широко распространения и доступности программного обеспечения нейронные сети завоевали огромную популярность [15–18]. Были

разработаны и комбинированные подходы, основанные на эталонной модели [19, 20]. В работе [21] представлен пример нейросети с прямой связью для идентификации модели небольшого вертолета. Представлено сравнение офлайн и онлайн обучения. В статье [22] рассмотрен подход с использованием рекуррентных нейросетей долгой краткосрочной памяти. Данный тип нейросети устойчив к изменяющемуся временному шагу и обычно используется для анализа аудио и видео. Существует не так много работ по идентификации сложных объектов управления. В работах [23, 24], представлен новый алгоритм SINDy (Sparse identification of nonlinear dynamical systems), позволяющий описывать динамику системы. Авторы продемонстрировали работоспособность алгоритма на широком круге задач, включая линейные и нелинейные осцилляторы и хаотическую систему Лоренца. Однако, данный алгоритм требует высокого качества входных данных. Известны также подходы к идентификации нейросетевых моделей [25, 26] мобильных роботов, но они еще не получили должного развития.

В статье представлена реализация смешанного подхода к идентификации объекта управления на основе применения нейросетей и расчета оптимального управления для полученной модели.

В качестве объекта управления рассматривается колесный мобильный робот. Разрабатывается программная реализация системы управления робота с использованием операционной системы ROS. Она предоставляет возможность работать со всеми аспектами системы управления, включая аппаратную абстракцию, низкоуровневое управление, передачу сообщений между процессами, и управление пакетами.

Разрабатываемые программные комплексы отрабатывались в имитационной среде-симуляторе Gazebo, которая является одним из популярнейших робототехнических симуляторов, благодаря своей совместимости с ROS. Gazebo - это 3D-симулятор, цель которого смоделировать робота так, чтобы дать близкую замену тому, как робот будет вести себя в реальной физической среде. Gazebo имеет достаточно достоверную симуляцию физики и различных физических явлений, учитывает влияние сил, а также имеет большое количество плагинов для симуляции работы датчиков, например лидаров или камер. Благодаря этим фактам, большинство разработчиков систем управления робототехнических систем по всему миру, используют данную связку ROS/Gazebo как стандарт для отработки разрабатываемых алгоритмов управления [27, 28].

В настоящей работе была использована готовая Gazebo модель ROSbot 2.0, интегрированная в ROS [29]. В качестве источника позиции,

использовался плагин, дающий истинные координаты робота. Модель робота в симуляторе представлена на рисунке 1.

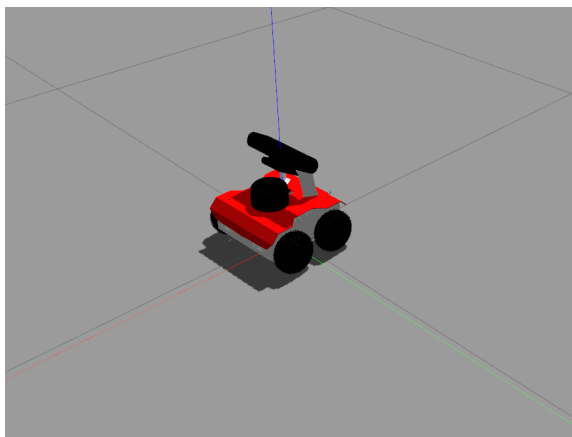


Рис. 1. ROSbot в симуляторе Gazebo

Представлен смешанный подход к идентификации, когда частично модель объекта известна, исходя из физических законов, а другая часть определяется нейронной сетью, обученной на основе специально сформированной обучающей выборки.

После реализации этапа идентификации, полученная модель с целью апробации была использована для численного решения задачи оптимального управления. Представленные результаты моделирования и симуляции в Gazebo демонстрируют адекватность полученной нейросетевой модели.

Получение рабочей адекватной модели реального объекта управления открывает возможность для разработки реализуемых алгоритмов оптимального управления, учитывающих тонкости динамики объекта.

**2. Идентификация объекта управления.** В работе используется виртуальный робот ROSbot 2.0, реализованный в среде для физической симуляции Gazebo. Робот представляет собой платформу на четырех неповорачивающихся вокруг вертикальной оси колесах. К каждому колесу присоединен электромотор. Используется дифференциальная схема управления: движение робота вперед и назад осуществляется путем подачи одинакового напряжения на все четыре электромотора; поворот робота вправо или влево осуществляется за счет подачи большего напряжения на электромоторы левых или правых колес соответственно.

Система координат, используемая для определения модели робота, показана на рисунке 2. Состояние робота в каждый момент времени определяется набором чисел:  $\{x, y, \theta, v, \omega\}$ , где  $x, y$  – координаты робота на плоскости,  $\theta$  – угол между осью  $x$  и направлением робота,  $v$  – проекция скорости движения робота  $\vec{v}$  на направление робота  $\vec{h}$ ,  $\omega$  – угловая скорость. Предполагается, что вектора  $\vec{v}$  и  $\vec{h}$  коллинеарны.

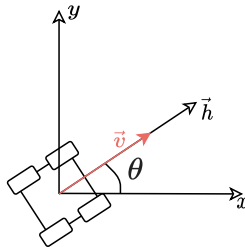


Рис. 2. Система координат робота. Вектор  $\vec{h}$  показывает направление робота при движении вперед. Вектором  $\vec{v}$  обозначена скорость движения робота.

Модель движения робота описывается известной системой дифференциальных уравнений [30]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} . \quad (1)$$

Физически управление роботом в Gazebo реализовано с помощью двух сигналов:  $u^v$  – желаемая линейная скорость;  $u^\omega$  – желаемая угловая скорость. Во многих работах для расчета оптимальных движений используется модель, в соответствии с которой сигналы управления напрямую передаются в систему  $v = u^v$ ,  $\omega = u^\omega$ . В этом случае уравнения (1) преобразуются в следующие:

$$\begin{cases} \dot{x} = u^v \cos(\theta) \\ \dot{y} = u^v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = u^\omega \end{cases} . \quad (2)$$

Однако, на практике наблюдается совершенно иная картина. Во-первых, скорости не могут меняться бесконечно быстро. У системы всегда есть определенная динамика. Во-вторых, как правило, существуют некоторый регулятор на более низком уровне, который непосредственно управляет скоростью вращения колес (в симуляторе) или напряжением,

выдаваемым на моторы (на реальном роботе). Поэтому для адекватного описания модели движения робота, в систему (1) введены два дополнительных уравнения, описывающих инерционную часть системы.

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \\ \dot{v} = f^v(v, \omega, u^v, u^\omega) \\ \dot{\omega} = f^\omega(v, \omega, u^v, u^\omega) \end{cases}, \quad (3)$$

где  $f^v, f^\omega$  - неизвестные функции, которые необходимо идентифицировать. Такие факторы, как работа неизвестного регулятора, трение колес о поверхность, инерция, неравномерное распределение массы робота не позволяют записать функции  $f^v, f^\omega$  в явном виде.

Для численной реализации задачи идентификации запишем уравнение (3) в конечно-разностной форме при временном шаге  $\Delta t$ :

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \Delta t \cdot v_k \cos(\theta_k) \\ y_{k+1} = y_k + \Delta t \cdot v_k \sin(\theta_k) \\ \theta_{k+1} = \theta_k + \Delta t \cdot \omega_k, \\ v_{k+1} = F^v(v_k, \omega_k, u_k^v, u_k^\omega, \Delta t) \\ \omega_{k+1} = F^\omega(v_k, \omega_k, u_k^v, u_k^\omega, \Delta t) \end{cases}. \quad (4)$$

Для идентификации системы в работе было использовано приближение функций  $F^v, F^\omega$  параметрическими функциями  $F_\phi^v$  и  $F_\phi^\omega$ . Обучаемая функция с параметрами  $\phi$  принимает на вход текущее состояние робота, вектор управления и временной шаг и выдает состояние робота в следующий момент времени:

$$\begin{cases} v_{k+1} = F_\phi^v(v_k, \omega_k, u_k^v, u_k^\omega, \Delta t) \\ \omega_{k+1} = F_\phi^\omega(v_k, \omega_k, u_k^v, u_k^\omega, \Delta t) \end{cases}. \quad (5)$$

Параметры  $\phi$  подбираются таким образом, чтобы траектория движения объекта, описываемого системой уравнений (4) с моделью (5), как можно ближе повторяла реальную траекторию движения робота в Gazebo.

Ниже сравнивается модель (2) с моделью (3), чтобы понять какое преимущество дает учет динамики системы и неизвестного регулятора при решении задачи оптимального управления.

**2.1. Формирование обучающей выборки.** Был выбран принцип обучения с учителем, при котором нейросеть обучается с помощью набора

данных "вход - эталонный выход", а затем проверяется с помощью набора валидационных и тестовых данных, которые не попадали в обучающую выборку.

Для сбора данных использовался симулятор Gazebo и написан программный пакет для автоматизации процесса сбора [31] с помощью двух основных ROS-узлов (ROS-nodes).

Первый узел – генератор управления, публикующий сгенерированную по определенным правилам последовательность управления для робота. Длительность одного проезда  $\sim 50$  с. Для каждого нового эксперимента случайным образом выбирались следующие параметры генератора управления: период изменения линейной скорости, период изменения угловой скорости, предельные значения и ускорения для линейной и угловой скоростей. Весь проезд разбивался на несколько периодов изменения скорости. В течение одного периода, робот ускорялся или замедляется с заданным ускорением, скорость не изменялась при достижении заданного предела. По завершении каждого периода знак ускорения менялся.

Второй ROS узел сохранял последовательность истинных координат и векторов состояния робота в течение движения, текущее управление и временную отметку. Временной шаг между отметками для каждого проезда генерировался случайно с равномерным распределением от 0.03 до 0.2 сек. Планируемый временной шаг для работы НС равнялся 0.1 сек. Варьирование временного шага использовалось для расширения диапазона работы НС. Часть данных, таких как примеры агрессивного вождения, собиралась с помощью телеуправления.

На рисунке 3 представлены примеры собираемых траекторий. Можно увидеть, как сильно расходятся движения простой модели и реального робота в симуляторе при одинаковых управляющих воздействиях.

Всего было собрано 238 траекторий, из них 202 использовалось для обучения, 18 для валидации и 18 для тестирования нейросети.

Для того, чтобы нейросеть после обучения с учителем могла предсказать следующее состояние системы, набор данных для обучения должен содержать как можно больше всевозможных состояний системы [11]. Поэтому, диапазон собранных значений для линейной скорости принимался равным от -1.5 до 1.5 м/с, а угловой скорости — от -2.5 до 2.5 рад/с. Собранные данные имеют нормальное распределение (см. рисунок 4). По диагонали показаны частоты различных значений величин  $v$ ,  $\omega$ ,  $u_v$ ,  $u_\omega$ . Вне диагонали показаны совместные распределения разных величин.

Для простой модели (2) также сохраняется последовательность координат и векторов состояния в течение движения, для того, чтобы в дальнейшем оценить эффективность работы нейросетевой модели. Сбор

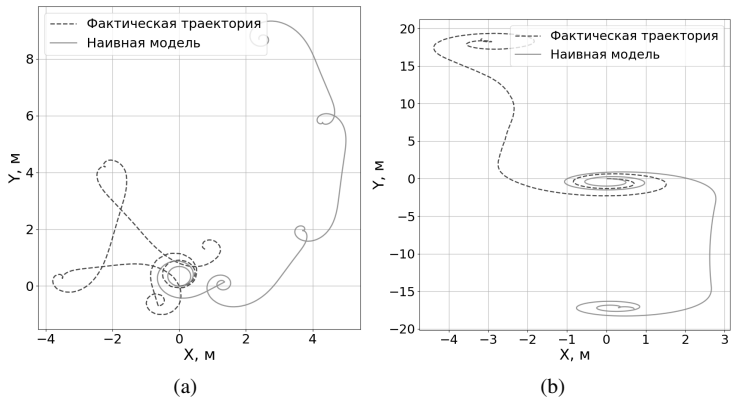


Рис. 3. Пример траекторий собранных с помощью генератора управления

данных о поведении простой модели происходит одновременно со сбором данных о работе.

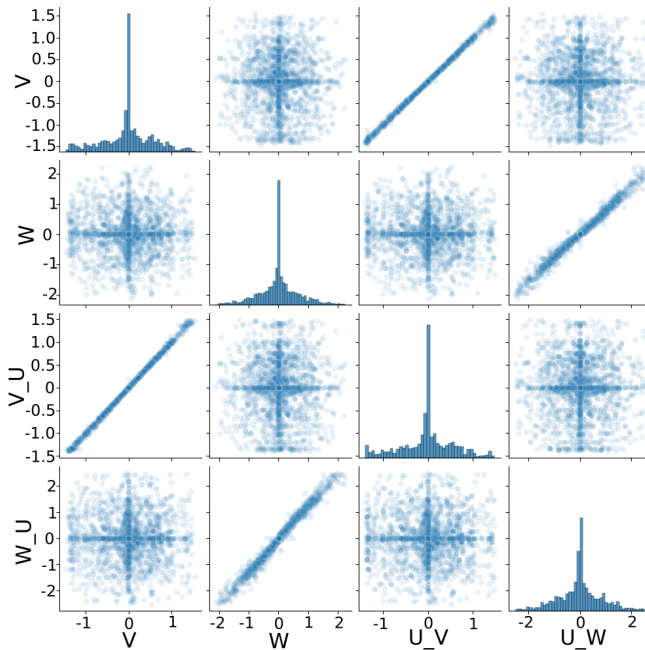


Рис. 4. Распределение данных



**2.2. Обучение нейронной сети.** В качестве обучаемой модели (5) была выбрана искусственная нейронная сеть с архитектурой "многослойный персептрон". Конкретные параметры модели описаны ниже.

*Программное обеспечение.* Для обучения нейросети использовался фреймворк PyTorch и был создан программный пакет с открытым исходным кодом для обучения нейросетевой модели [32]. Обучение реализовано с помощью трех основных классов, написанных на языке python.

Класс модели робота RosbotModel - данный класс содержит нейросеть, методы для расчета функции потерь, метрик, функцию перехода в следующее состояние. Для нейросети можно задать необходимые параметры: количество слоев, нейронов, тип модели и т.д. Можно сказать, что RosbotModel предоставляет интерфейс для взаимодействия с нейросетевой моделью, а также методы для оценки ее эффективности.

Класс RosbotDataset представляет собой структуру, содержащую набор данных об одном собранном проезде. Каждый объект класса содержит информацию о залогированном проезде и предоставляет интерфейс для взаимодействия с данными.

Класс Trainer содержит методы для непосредственного обучения нейронной сети. Данные методы взаимодействуют с объектами RosbotModel и массивами из RosbotDataset.

Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

*Метрика качества модели.* Для оценки качества модели оценивалась точность предсказания траектории движения моделью на проездах, которые не были включены в обучающую выборку. Нейросеть получает на вход начальное состояние системы и последовательность управления для тестового проезда. Как и на этапе обучения, предсказывается траектория движения робота. Для сравнения предсказанной и действительной траекторий была использована метрика АТЕ – средний модуль поступательного смещения (absolute translation error):

$$ATE = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N \sqrt{(x_t - \hat{x}_t)^2 + (y_t - \hat{y}_t)^2},$$

где  $N$  - количество точек в траектории;  $x_t, y_t$  – координаты точки фактической траектории;  $\hat{x}_t, \hat{y}_t$  – координаты точки предсказанной траектории.

Для оценки качества предсказанного угла была использована метрика MAE – средний модуль отклонения (mean absolute error).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N |yaw_t - \hat{y}aw_t|,$$

где  $yaw_t$  – фактическая величина угла рысканья;  $\hat{y}aw_t$  – предсказанное значение угла рысканья.

*Многошаговая функция потерь.* При обучении нейросети минимизируется отклонение предсказанных состояний  $\{\mathbf{x}_k\}_{k=n}^{n+N}$  от истинных  $\{\hat{\mathbf{x}}_k\}_{k=n}^{n+N}$  на отрезке траектории  $k \in [n, n + N]$

$$\mathcal{L} = \sum_{k=n}^{n+N} (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)^2. \quad (6)$$

Начало отрезка  $n$  выбирается случайно. Длина отрезка  $N$  является внешним параметром. Предсказание состояний  $\{\mathbf{x}_k\}_{k=n}^{n+N}$  делается последовательно, начиная с известного начального состояния  $\hat{\mathbf{x}}_n$ . При этом в нейросеть на каждом шаге, начиная со второго, подается предыдущее предсказание:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k=n+1} = F_\phi(\hat{\mathbf{x}}_n, \Delta t) \\ \mathbf{x}_{k>n+1} = F_\phi(\mathbf{x}_{k-1}, \Delta t) \end{cases}. \quad (7)$$

При обучении методом градиентного спуска, ошибка одного предсказанного состояния  $\mathbf{x}_k$  влияет на работу нейросети на всех предыдущих шагах, так как градиент, при обратном распространении ошибки, передается дальше через переменную  $\mathbf{x}_{k-1}$ , которая является выходом нейросети на предыдущем шаге.

При тестах выяснено, что многошаговая функция потерь (при  $N > 1$ ) приводит к модели, которая значительно лучше предсказывает реальную траекторию робота, согласно метрикам, введенным выше, чем при  $N = 1$ . Это объясняется тем, что наличие шума в данных и конечный размер обучающей выборки приводят к переобучению модели. Многошаговая функция потерь значительно снижает дисперсию градиента при оптимизации методом градиентного спуска, и, тем самым, борется с переобучением. Аналогичные результаты с многошаговой функцией потерь описаны в [17].

*Параметры модели.* Параметры модели, такие как количество слоев, число нейронов в слоях, а также функция активации, подбирались экспериментально путем сравнения метрики АТЕ на валидационной выборке. Число слоев персептрона выбиралось в диапазоне между 2

и 10. Число нейронов на всех скрытых слоях делалось одинаковым и выбиралось между 16 и 1024. Были протестированы функции активации ReLU, LeakyReLU и ELU.

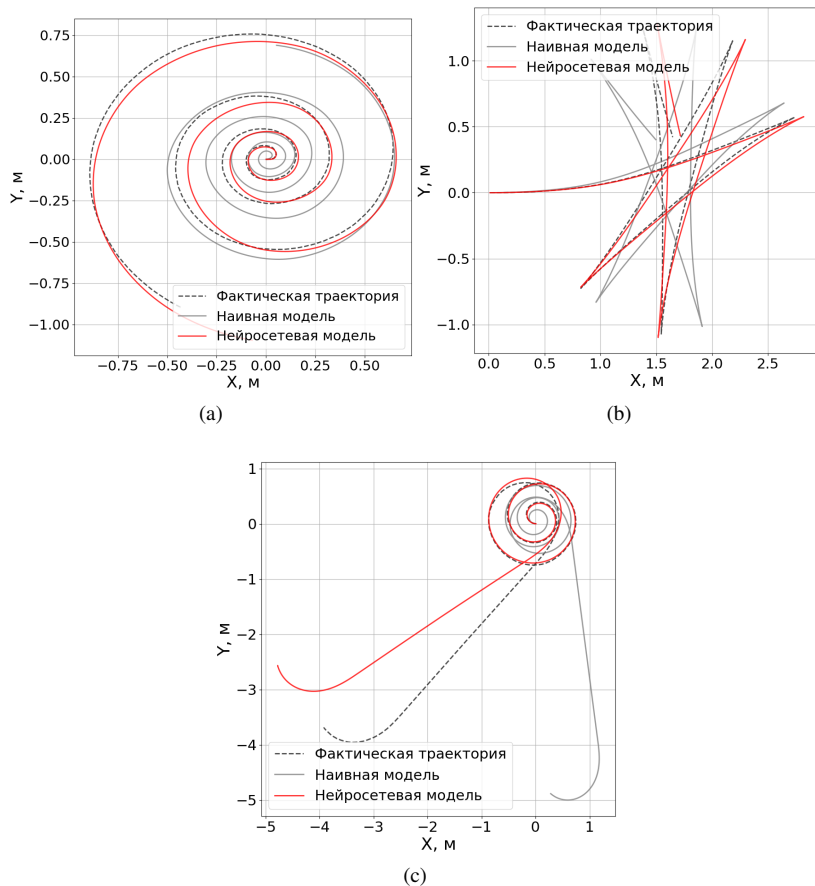


Рис. 5. Примеры предсказанных траекторий

В виду затратности перебора всех возможных комбинаций по времени, была выбрана следующая тактика исследования параметров. Зафиксировав число нейронов на значении 128 для каждой функции активации, были проверены разные количества слоев. Для всех функций активации оказалось, что 4 слоя всегда дают меньшее значение метрики.

Этот параметр был зафиксирован. Далее были проведены эксперименты с разным количеством нейронов и разными функциями активации.

В результате сравнения, наиболее точной показала себя нейросеть с 4 слоями, с 128 нейронами на всех скрытых слоях и функцией активации ELU. Результаты обучения нейросетевой модели представлены на рисунке 5. Среднее значение АТЕ по всем тестовым траекториям составило 0.66 м. Для простой модели среднее значение АТЕ – 2.66 м.

**3. Решение задачи оптимального управления.** Для верификации возможности использования идентифицированной модели для управления роботом решим задачу оптимального управления.

Задана математическая модель колесного робота (4), куда входит функция, реализуемая нейросетью, определяющая значения скоростей робота в зависимости от текущих значений скорости и текущих управляющих воздействий.

Управление имеет ограничения

$$-1 \leq u_i \leq 1, \quad i = 1, 2.$$

Задано начальное и целевое конечное состояние:

$$\mathbf{x}^0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$\mathbf{x}^f = [x^f \ y^f \ \theta^f \ 0 \ 0]^T.$$

В рассматриваемой задаче заданы фазовые ограничения в виде статических препятствий круглой формы.

Функционал качества управления включает в себя время достижения целевой точки, минимальное расстояние от траектории робота до целевой точки, длину траектории и штраф за наезд на препятствие:

$$J = a_0 t_f +$$

$$a_1 \sqrt{(x^f - x(t_f))^2 + (y^f - y(t_f))^2 + (\theta^f - \theta(t_f))^2} +$$

$$a_2 \sum_{k=1}^{N-1} \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} +$$

$$a_3 \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^K \vartheta (r_i^2 - (\bar{x}_i - x(j\Delta t))^2 - (\bar{y}_i - y(j\Delta t))^2) \Delta t \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $t_f$  - ограниченное время завершения процесса управления

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^f\| \leq \varepsilon \\ t^+ & - \text{ иначе} \end{cases},$$

$\varepsilon$  и  $t^+$  - заданные положительные величины,  $N = t_f/dt$  - количество шагов по времени до достижения целевой точки,  $dt$  - шаг по времени равный 50 мс,  $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$  - координаты центров заданных фазовых ограничений,  $r_i$  - радиусы заданных фазовых ограничений,  $i = 1, \dots, S$ ,  $S$  - количество ограничений,  $K = \left\lfloor \frac{t^+}{\Delta t} \right\rfloor$ ,  $a_0, a_1, a_2, a_3$  - весовые коэффициенты,  $\vartheta(a)$  - ступенчатая функция Хевисайда.

Задача оптимального управления заключается в нахождении такой последовательности управляющих воздействий  $u_k^v, u_k^\omega$ , которые минимизируют функцию  $J$ . Алгоритм должен выдавать управляющие сигналы  $u_k^v, u_k^\omega$  для  $k = (1..N = t_f/dt)$ , где  $t_f \leq t^+$  - время достижения роботом целевой точки, а  $dt = 50$  мс. Для  $t^+ = 10$  с  $N = 200$ , что дает размерность пространства, в котором надо найти минимум функции стоимости  $J$ , равное 400. Для численного решения задачи оптимального управления применим прямой общий подход на основе кусочно-полиномиальной аппроксимации функции управления во времени. В связи с большой размерностью пространства поиска в настоящей работе будем искать управление в кусочно-линейном виде, т.е. искать управляющие воздействия с временным шагом равном 1 сек, а в промежутках выдавать управление по линейному закону. Причем, если оптимизационный алгоритм выдает управление, выходящее за рамки допустимых управлений, то линейная функция ограничивается допустимым пределом.

Для поиска минимума функции (8) применяем оптимизационный метод роя частиц PSO [33, 34]. За счет фазовых ограничений функционал (8) имеет невыпуклую форму, а значит градиентные методы могут не найти глобальный минимум. Метод PSO в противоположность градиентным методам не требует дифференцируемости функции, а также способен широко исследовать пространство поиска и находит глобальный минимум с большой вероятностью [35].

**3.1. Метод PSO для расчета оптимального управления.** Формально, определим функцию стоимости  $f : R^n \rightarrow R$ , глобальный минимум которой следует найти. Функция принимает на вход вектор из  $n$  вещественных чисел и возвращает вещественное число. Градиент  $f$  неизвестен и не требуется. Задача найти такой вектор  $\mathbf{a}$ , для которого  $f(\mathbf{a}) < f(\mathbf{b})$  для любого  $\mathbf{b}$  из пространства поиска, т.е. найти глобальный минимум.

Классический метод PSO итеративно подбирает аргументы многомерной функции стоимости, стремясь найти ее глобальный минимум. Метод использует следующую терминологию. Существует популяция или рой частиц.  $S$  – количество частиц в рое. Каждая частица имеет положение  $\mathbf{x}_i \in R^n$  и скорость  $\mathbf{v}_i \in R^n$ . Частицы итеративно перемещаются в пространстве поиска решения в соответствии с уравнением движения. Для каждой частицы хранится ее лучшее положение за все итерации:  $\mathbf{p}_i \in R^n$ . Также хранится вектор  $\mathbf{g} \in R^n$  – лучшее положение среди всех частиц роя за все итерации. На каждой итерации алгоритма скорость частицы меняется так, чтобы ее положение  $\mathbf{x}_i$  стремилось одновременно к  $\mathbf{p}_i$  и к  $\mathbf{g}$ . На движение частицы оказывают влияние еще и случайные величины. Критерием останова вычислений может быть либо достижение заданного значения функции стоимости, либо выполнение заданного количества итераций.

Псевдокод PSO описан в алгоритме 1. Значения  $\mathbf{b}_{lo}$  и  $\mathbf{b}_{up}$  ограничивают пространство поиска. Параметры  $\omega$ ,  $\phi_p$ ,  $\phi_g$  и  $\alpha$  устанавливаются пользователем и существенно влияют на скорость сходимости алгоритма.

Для расчета оптимального управления с помощью метода PSO, требуется определить функцию стоимости и пространство поиска решения. Пространство поиска решения было задано как пространство последовательностей управляющих сигналов  $u_k^v, u_k^\omega$ , заданных с шагом по времени в 1 сек. Каждая такая последовательность – это одна частица из роя. В функцию стоимости траектории (8) управление напрямую не входит, поэтому для определенной частицы надо сначала получить траекторию. В коде это делается с помощью функции **propagate control to states**. На вход она принимает последовательность управляющих сигналов  $u_k^v, u_k^\omega$ , заданных с шагом по времени в 1 сек. Далее шаг уменьшается до 50 мс с помощью линейной интерполяции. После чего для расчета зависимости скорости от времени начальное состояние робота и вся последовательность управления подается на вход модели робота (наивной (2) и нейросетевой (5)). И, наконец, зависимость скорости от времени преобразуется в траекторию в соответствии с (4). Полная блок-схема алгоритма приведена на рисунке 6.

В работе использовались следующие параметры алгоритма PSO:  $\omega = 1, \phi_p = 0.95, \phi_g = 0.05, \alpha = 1.0$ . Алгоритм стабильно сходится к минимальным значениями функции стоимости за несколько сотен итераций. Результаты расчета в виде зависимости сигналов управления от времени приведены на рисунке 7, а соответствующая траектория движения – на рисунке 8.

**Algorithm 1** PSO

---

Задать лучшее известное положение всех частиц:

$$\mathbf{g} \sim U(\mathbf{b}_{lo}, \mathbf{b}_{up})$$

**for** частица  $i=1, \dots, S$  **do**

    Задать начальное положение частицы:

$$\mathbf{x}_i \sim U(\mathbf{b}_{lo}, \mathbf{b}_{up})$$

    Лучшее известное положение этой частицы:

$$\mathbf{p}_i \leftarrow \mathbf{x}_i$$

    Уточнить лучшее известное положение среди всех частиц:

**if**  $f(\mathbf{p}_i) < f(\mathbf{g})$  **then**

$$\quad \mathbf{g} \leftarrow \mathbf{p}_i$$

**end if**

    Задать скорость частицы:

$$\mathbf{v}_i \leftarrow U(-|\mathbf{b}_{up} - \mathbf{b}_{lo}|, |\mathbf{b}_{up} - \mathbf{b}_{lo}|)$$

**end for**

**while** критерий останова не достигнут **do**

**for** частица  $i=1, \dots, S$  **do**

**for** координата  $d=1, \dots, n$  **do**

            Сэмплировать случайные числа:

$$r_p, r_g \sim U(0, 1)$$

            Обновить скорость частицы:

$$\mathbf{v}_i^d \leftarrow \omega \cdot \mathbf{v}_i^d + \phi_p r_p \cdot (\mathbf{p}_i^d - \mathbf{x}_i^d) + \phi_g r_g \cdot (\mathbf{g}^d - \mathbf{x}_i^d)$$

            Где  $\phi_p, \phi_g$  – постоянные коэффициенты.

**end for**

        Обновить положение частицы:

$$\mathbf{x}_i \leftarrow \mathbf{x}_i + \alpha \cdot \mathbf{v}_i$$

        Где  $\alpha$  – постоянный коэффициент.

        Уточнить лучшее известное положение частицы:

**if**  $f(\mathbf{x}_i) < f(\mathbf{p}_i)$  **then**

$$\quad \mathbf{p}_i \leftarrow \mathbf{x}_i$$

**end if**

        Уточнить лучшее известное положение среди всех частиц:

**if**  $f(\mathbf{p}_i) < f(\mathbf{g})$  **then**

$$\quad \mathbf{g} \leftarrow \mathbf{p}_i$$

**end if**

**end for**

**end while**

---

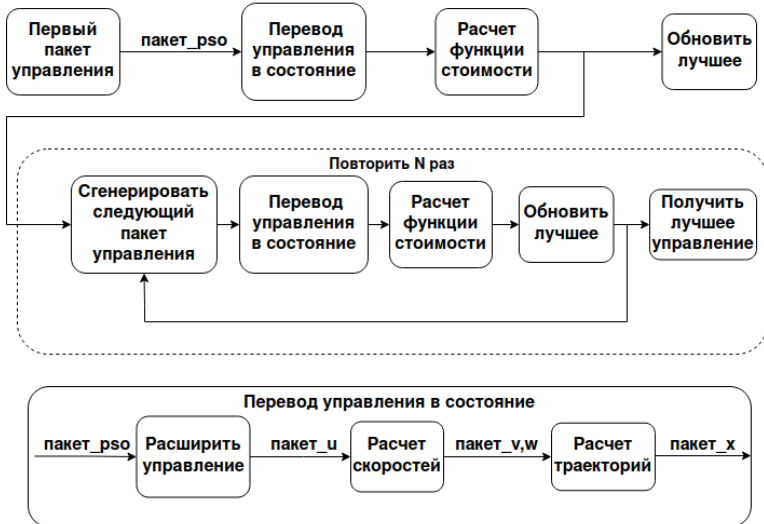


Рис. 6. Блок-схема алгоритма PSO для расчета оптимального управления

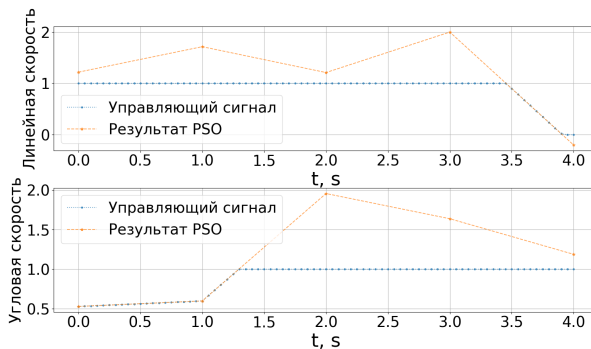


Рис. 7. Результаты расчета оптимального управления

**3.2. Верификация полученного управления в симуляторе.** Для того, чтобы убедиться в том, что нейросеть может использоваться не только для моделирования, но и для планирования движения реального робота, необходимо проверить, будет ли робот двигаться по той же траектории, что и модель при планировании. В общем случае это может оказаться не так, даже если модель показывает хорошие результаты предсказаний на тестовых проездах. Для этого найденная оптимальная последовательность



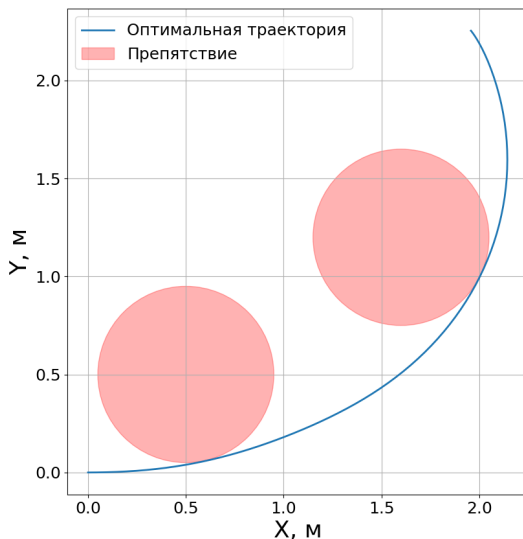


Рис. 8. Результаты расчета оптимальной траектории

управляющих сигналов была подана на робот в симуляторе Gazebo. Было сделано 10 проездов, в каждом из которых на робот в Gazebo подавалась одинаковое управление. Примеры полученных траекторий проездов в симуляторе представлены на рисунке 9-(а). Траектории проездов оказываются разными вследствие того, что Gazebo моделирует реальную систему со своими случайными возмущениями, а в данном случае по сути реализовано разомкнутое управление без обратной связи.

Для сравнения полученной нейросетевой модели управления с наивной моделью (2) задача оптимального управления была также решена и для наивной модели. Полученное управление было подано на робота в Gazebo, и также были собраны траектории по 10 проездам (рисунок 9-(б)).

Отклонение реальной траектории от запланированной было оценено с помощью метрики АТЕ. АТЕ для наивной модели составила  $0.34 \pm 0.16$ , для нейросетевой модели  $0.11 \pm 0.04$ . Это говорит о том, что нейросетевая модель лучше описывает изменение состояния робота.

**4. Заключение.** В настоящей работе представлен подход на основе нейронной сети для идентификации модели объекта управления. Используется смешанный подход, когда модель объекта частично известна. На основе представленного подхода была создана модель колесного робота Rosbot 2.0 в симуляционной среде Gazebo с помощью искусствен-

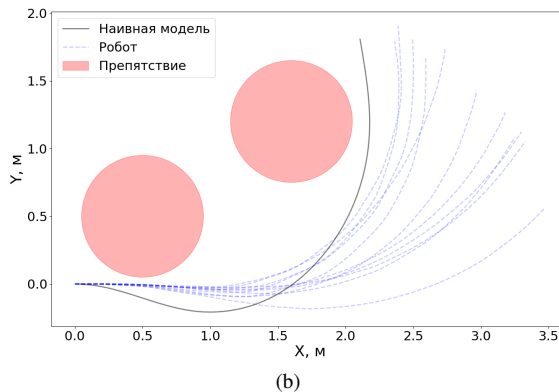
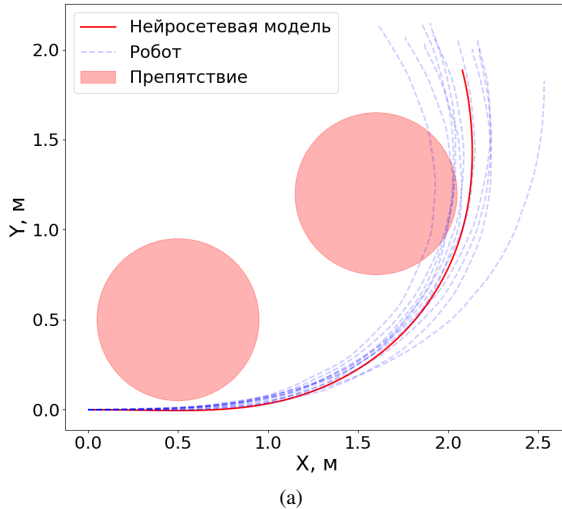


Рис. 9. Пример проездов робота в симуляторе Gazebo по запланированной траектории. Проезды робота различаются между собой из-за недетерминированного поведения симулятора Gazebo. Отображенные препятствия учитывались при планировании движения

ной нейросети. Эксперименты показали, что нейросеть предсказывает движение колесного робота и может автоматически учитывать такие факторы, как инерция и сила трения. Показано, что с помощью нейросетевой модели можно планировать оптимальную траекторию движения робота. Ошибка нейросетевой модели как при моделировании движения, так и при

планировании траектории оказалась незначительно больше, чем разброс траекторий вследствие недетерминированного поведения самой системы.

Основными сильными сторонами представленного подхода являются его практическая реализуемость и универсальность применения. В настоящей работе все данные для обучения нейросети формируются с имитационного симулятора Gazebo, который максимально близко к реальным воспроизводит физику роботов и внешней среды, учитывая возможные помехи и неопределенности. Использование симулятора Gazebo позволило автоматизировать процесс сбора данных для обучения нейронной сети. Кроме того, в настоящей работе мы протестировали полученную нейросетевую модель на примере решения прикладных задач, таких как задача оптимального управления.

Представленную модель можно использовать как для оптимального планирования маршрута в известных условиях, как представлено в статье, так и при разработке других алгоритмов, основанных на предсказании поведения модели. Представленный метод идентификации открыт для использования и редактирования, исходный код находится в репозитории Github [31, 32]. В качестве дальнейшей работы полученную модель планируется использовать для численных расчетов в различных задачах оптимального управления с фазовыми ограничениями, в том числе с динамическими фазовыми ограничениями, когда в задаче имеется группа роботов, а также в задаче навигации для дополнительного уточнения положения робота по модели в условиях автономного движения, а также при реализации алгоритмов планирования пути на основе предсказания поведения модели.

### Литература

1. Зенкевич С.Л., Назарова А.В. Система управления мобильного колесного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2006. № 3, С.31–51.
2. Gazebo simulation environment tutorial. URL: [https://www.gazebosim.org/tutorials?tut=ros\\_overview](https://www.gazebosim.org/tutorials?tut=ros_overview) (дата обращения: 26.11.2021).
3. Ljung L. System Identification: Theory for the User (second ed.) // Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
4. Dastango P., Ramirez-Serrano A. Non-linear Parameter Identification for Humanoid Robot Components // The 7th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics. 2020.
5. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем: учеб. для студ. высш. учеб. заведений // М.: Издательский центр «Академия», 2009.
6. Cox P., Toth R. Linear parameter-varying subspace identification: A unified framework // Automatica. 2021. 123. 109296.
7. Sjöberg J., Zhang Q., Ljung L., Benveniste A., Delyon B., Glorennec P., Hjalmarsson H., Juditsky A. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview // Automatica. 1995. vol. 31(12). pp. 1691—1724.

8. Nelles O. *Classical Polynomial Approaches // Nonlinear System Identification*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
9. Fakhrizadeh Esfahani A., Dreesen P., Tiels K., Noël J.-P., Schoukens J. *Parameter reduction in nonlinear state-space identification of hysteresis // Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. 104.
10. Liu G. P. *Nonlinear identification and control: a neural network approach // Springer Science & Business Media*. 2012.
11. Werbos P. J. (n.d.). *Neural networks for control and system identification // Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control*. 1989.
12. Fu Z. J. et al. *Nonlinear systems identification and control via dynamic multitime scales neural networks //IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2013. vol. 24. no. 11. pp. 1814–1823.
13. Dang, T.P., Diveev, A.I., Kazaryan, D.E., Sofronova, E.A. *Identification Control Synthesis By The Network Operator Method // Proceedings 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2015. pp. 1559–1564.
14. Дивеев А.И., Софронова Е.А., Шмалько Е.Ю. *Метод идентификационного синтеза управления и его применение к мобильному роботу // Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2016. № 2. С. 53-61.
15. Gautam P. *System identification of nonlinear Inverted Pendulum using artificial neural network // 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*. 2016. pp. 1–5.
16. Zheng D. D., Xie W. F., Luo C. *Robust identification for singularly perturbed nonlinear systems using multi-time-scale dynamic neural network //2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2017. pp. 6487–6492.
17. Mohajerin N., Waslander S. L. *Multistep prediction of dynamic systems with recurrent neural networks //IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2019. vol. 30. no. 11. pp. 3370–3383.
18. Khodabandehlou H., Fadali M. S. *Nonlinear System Identification using Neural Networks and Trajectory-Based Optimization //arXiv preprint arXiv:1804.10346*. 2018.
19. Williams G. et al. *Aggressive driving with model predictive path integral control //2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016. pp. 1433–1440.
20. Williams G. et al. *Autonomous racing with autorally vehicles and differential games //arXiv preprint arXiv:1707.04540*. 2017.
21. Samal, M. K., Anavatti, S., Garratt, M. *Neural Network Based System Identification for Autonomous Flight of an Eagle Helicopter // IFAC Proceedings*. 2008. vol. 41(2). pp. 7421—7426. 2008.
22. Yu Wang. *A new concept using LSTM Neural Networks for dynamic system identification // American Control Conference (ACC)*. 2017.
23. Brunton S.L., Proctor J.L., Kutz J.N. *Discovering governing equations from data: Sparse identification of nonlinear dynamical systems*. 2015.
24. Kaiser E., Kutz J. N., Brunton S. L. *Sparse identification of nonlinear dynamics for model predictive control in the low-data limit //Proceedings of the Royal Society A*. 2018. vol. 474. no. 2219. P. 20180335.
25. Jian'an X., Mingjun Z., Jian Z. *Kinematic model identification of autonomous mobile robot using dynamical recurrent neural networks //IEEE International Conference Mechatronics and Automation*. 2005. vol. 3. pp. 1447–1450.
26. Roy T., Barai R.K. and Dey R. *Identification of Differentially Driven Wheeled Mobile Robot using Neural Networks // International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. 2013. vol. 2(2). pp.38–45.

27. Lavrenov R., Magid E., Matsuno F., Svinin M., Suthakorn J. Development and Implementation of Spline-based Path Planning Algorithm in ROS/Gazebo Environment // SPIRAS Proceedings. 2019. Vol. 18. pp. 57-84.
28. Zhang B., Liu P. Control and benchmarking of a 7-DOF robotic arm using Gazebo and ROS // PeerJ Computer Science. 2021. Vol. 7.
29. URL: [https://github.com/husarion/rosbot\\_description](https://github.com/husarion/rosbot_description) (дата обращения: 26.11.2021).
30. Šuster P., Jadlovska A. Tracking Trajectory of the Mobile Robot Khepera II Using Approaches of Artificial Intelligence // Acta Electrotechnica et Informatica. vol. 11.
31. Программный пакет для сбора данных для обучения сети в симуляторе Gazebo URL: <https://github.com/urock/rosbot> (дата обращения: 26.11.2021).
32. Программный пакет для обучения нейросетевой модели URL: [https://github.com/FastSense/robot\\_model\\_training](https://github.com/FastSense/robot_model_training) (дата обращения: 26.11.2021).
33. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization //Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. IEEE, 1995. vol. 4. pp. 1942–1948.
34. Diveev A., Shmalko E. Evolutionary Computation for Synthesis of Control System for Group of Robots and Optimum Choice of Trajectories for their Movement // Proceedings of the OPTIMA-2017 Conference, Petrovac, Montenegro. 2017. pp. 158–165.
35. Дивеев А.И., Константинов С.В. Исследование практической сходимости эволюционных алгоритмов оптимального программного управления колесным роботом // Известия РАН Теория и системы управления. 2018. № 4. том 57. С. 80–106.

**Шмалько Елизавета Юрьевна** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, отдел управления робототехническими устройствами, ФИЦ ИУ РАН. Область научных интересов: современные вычислительные методы в управлении техническими устройствами, методы символьной регрессии и эволюционные вычисления с приложениями для идентификации, оптимизации и синтеза систем управления. Число научных публикаций — 100. e.shmalko@gmail.com; Вавилова, 44/2, 119333, Москва, Россия; р.т.: +7(964)636-6669.

**Румянцев Юрий Андреевич** — аспирант, ФИЦ ИУ РАН. Область научных интересов: методы машинного обучения с приложениями для идентификации, оптимизации и синтеза систем управления, энергоэффективные бортовые вычислительные системы. Число научных публикаций — 0. urock@fastsense.tech; Вавилова, 14/2, 125124, Москва, Россия; р.т.: +7(926)590-9868.

**Байназаров Руслан Рысбекович** — инженер машинного обучения, ООО Фаст Сенс Студия. Область научных интересов: машинное обучение и наука о данных. Число научных публикаций — 0. ruslan@dtlabs.tech; Ямского поля 3-я, 2/8, 125124, Москва, Россия; р.т.: +7(926)590-9868.

**Ямшанов Константин Леонидович** — студент магистратуры, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: алгоритмы оптимизации, синтез систем управления. Число научных публикаций — 0. kostya.yam@dtlabs.tech; пр-т К. Маркса, 20, 630073, Новосибирск, Россия; р.т.: +7(926)590-9868.

E. SHMALKO, Yu. RUMYANTSEV, R. BAINAZAROV, K. YAMSHANOV  
**IDENTIFICATION OF NEURAL NETWORK MODEL OF ROBOT TO  
SOLVE THE OPTIMAL CONTROL PROBLEM**

---

*Shmalko E., Rumyantsev Yu., Bainazarov R., Yamshanov K.* **Identification of neural network model of robot to solve the optimal control problem.**

**Abstract.** To calculate the optimal control, a satisfactory mathematical model of the control object is required. Further, when implementing the calculated controls on a real object, the same model can be used in robot navigation to predict its position and correct sensor data, therefore, it is important that the model adequately reflects the dynamics of the object. Model derivation is often time-consuming and sometimes even impossible using traditional methods. In view of the increasing diversity and extremely complex nature of control objects, including the variety of modern robotic systems, the identification problem is becoming increasingly important, which allows you to build a mathematical model of the control object, having input and output data about the system. The identification of a nonlinear system is of particular interest, since most real systems have nonlinear dynamics. And if earlier the identification of the system model consisted in the selection of the optimal parameters for the selected structure, then the emergence of modern machine learning methods opens up broader prospects and allows you to automate the identification process itself. In this paper, a wheeled robot with a differential drive in the Gazebo simulation environment, which is currently the most popular software package for the development and simulation of robotic systems, is considered as a control object. The mathematical model of the robot is unknown in advance. The main problem is that the existing mathematical models do not correspond to the real dynamics of the robot in the simulator. The paper considers the solution to the problem of identifying a mathematical model of a control object using machine learning technique of the neural networks. A new mixed approach is proposed. It is based on the use of well-known simple models of the object and identification of unaccounted dynamic properties of the object using a neural network based on a training sample. To generate training data, a software package was written that automates the collection process using two ROS nodes. To train the neural network, the PyTorch framework was used and an open source software package was created. Further, the identified object model is used to calculate the optimal control. The results of the computational experiment demonstrate the adequacy and performance of the resulting model. The presented approach based on a combination of a well-known mathematical model and an additional identified neural network model allows using the advantages of the accumulated physical apparatus and increasing its efficiency and accuracy through the use of modern machine learning tools.

**Keywords:** optimal control, identification, neural network, Gazebo, differential robot.

---

**Shmalko Elizaveta** — Ph.D., Senior researcher, Department of robotic control, FRC CSC RAS. Research interests: modern computational methods in control of technical systems, symbolic regression methods and evolutionary computation with applications for identification, optimization and synthesis of control systems. The number of publications — 100. e.shmalko@gmail.com; 44/2, Vavilova, 119333, Moscow, Russia; office phone: +7(964)636-6669.

**Rumyantsev Yuri** — Ph.D., Senior researcher, Department of robotic control, FRC CSC RAS. Research interests: modern computational methods in control of technical systems, symbolic regression methods and evolutionary computation with applications for identification, optimization

and synthesis of control systems. The number of publications — 100. e.shmalko@gmail.com; 44/2, Vavilova, 119333, Moscow, Russia; office phone: +7(964)636-6669.

**Baynazarov Ruslan** — Engineer of machine learning, Fast Sense Studio. Research interests: data science and machine learning. The number of publications — 0. ruslan@dtlabs.tech; 2/8, Yamskogo field 3-rd Str., 125124, Moscow, Russia; office phone: +7(926)590-9868.

**Yamshanov Konstantin** — Graduate student, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Research interests: optimization algorithms, synthesis of control systems. The number of publications — 0. kostya.yam@dtlabs.tech; 20, K.Marx Str., 630073, Novosibirsk, Russia; office phone: +7(926)590-9868.

## References

1. Zenkevich S.L., Nazarova A.V. Sistema upravleniya mobil'nogo kolesnogo robota [Control system of a mobile wheeled robot] // Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Priborostroyeniye". 2006. № 3, pp.31-51. (In Russ.)
2. Gazebo simulation environment tutorial. URL: [https://www.gazebosim.org/tutorials?tut=ros\\_overview](https://www.gazebosim.org/tutorials?tut=ros_overview) (accessed: 26.11.2021).
3. Ljung L. System Identification: Theory for the User (second ed.) // Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
4. Dastangoo P., Ramirez-Serrano A. Non-linear Parameter Identification for Humanoid Robot Components // The 7th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics. 2020.
5. Alekseev A.A., Korablev Yu.A., Shestopalov M.Yu. Identifikatsiya i diagnostika sistem: ucheb. dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy [Identification and diagnostics of systems: textbook for students]. - Publishing Center "Academy", Moscow, 2009. (In Russ.)
6. Cox P., Toth R. Linear parameter-varying subspace identification: A unified framework // Automatica. 2021. 123. 109296.
7. Sjöberg J., Zhang Q., Ljung L., Benveniste A., Delyon B., Glorennec P., Hjalmarsson H., Judit-sky A. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview // Automati-ca. 1995. vol. 31(12). pp. 1691—1724.
8. Nelles O. Classical Polynomial Approaches // Nonlinear System Identification. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
9. Fakhrizadeh Esfahani A., Dreesen P., Tiels K., Noël J.-P., Schoukens J. Parameter reduction in nonlinear state-space identification of hysteresis // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. 104.
10. Liu G. P. Nonlinear identification and control: a neural network approach // Springer Science & Business Media. 2012.
11. Werbos P. J. (n.d.). Neural networks for control and system identification // Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control. 1989.
12. Fu Z. J. et al. Nonlinear systems identification and control via dynamic multitime scales neural networks //IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2013. vol. 24. no. 11. pp. 1814–1823.
13. Dang,T.P., Diveev, A.I., Kazaryan, D.E., Sofronova, E.A. Identification Control Synthesis By The Network Operator Method // Proceedings 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Elec-tronics and Applications (ICIEA). 2015. pp. 1559–1564.
14. Diveev A.I., Sofronova E.A., Shmalko E.Yu. Metod identifikatsionnogo sinteza upravleniya i ego primenenie k mobil'nomu robotu [Method of identification synthesis of control and its application to a mobile robot] // Information and Mathematical Technologies in

- Science and Management [Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii]. 2016. vol. 2. pp. 53–61. (In Russ.)
15. Gautam P. System identification of nonlinear Inverted Pendulum using artificial neural network // 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE). 2016. pp. 1–5.
  16. Zheng D. D., Xie W. F., Luo C. Robust identification for singularly perturbed nonlinear systems using multi-time-scale dynamic neural network // IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC). 2017. pp. 6487–6492.
  17. Mohajerin N., Waslander S. L. Multistep prediction of dynamic systems with recurrent neural networks //IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2019. vol. 30. no. 11. pp. 3370–3383.
  18. Khodabandehlou H., Fadali M. S. Nonlinear System Identification using Neural Networks and Trajectory-Based Optimization //arXiv preprint arXiv:1804.10346. 2018.
  19. Williams G. et al. Aggressive driving with model predictive path integral control // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2016. pp. 1433–1440.
  20. Williams G. et al. Autonomous racing with autorally vehicles and differential games //arXiv preprint arXiv:1707.04540. 2017.
  21. Samal, M. K., Anavatti, S., Garratt, M. Neural Network Based System Identification for Au-tonomous Flight of an Eagle Helicopter // IFAC Proceedings. 2008. vol. 41(2). pp. 7421—7426. 2008.
  22. Yu Wang. A new concept using LSTM Neural Networks for dynamic system identification // American Control Conference (ACC). 2017.
  23. Brunton S.L., Proctor J.L., Kutz J.N. Discovering governing equations from data: Sparse identification of nonlinear dynamical systems. 2015.
  24. Kaiser E., Kutz J. N., Brunton S. L. Sparse identification of nonlinear dynamics for model predictive control in the low-data limit //Proceedings of the Royal Society A. 2018. vol. 474. no. 2219. P. 20180335.
  25. Jian'an X., Mingjun Z., Jian Z. Kinematic model identification of autonomous mobile robot using dynamical recurrent neural networks // IEEE International Conference Mechatronics and Automation. 2005. vol. 3. pp. 1447–1450.
  26. Roy T., Barai R.K. and Dey R. Identification of Differentially Driven Wheeled Mobile Robot using Neural Networks // International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2013. vol. 2(2). pp.38–45.
  27. Lavrenov R., Magid E., Matsuno F., Svinin M., Suthakorn J. Development and Implementation of Spline-based Path Planning Algorithm in ROS/Gazebo Environment // SPIRAS Proceedings. 2019. Vol. 18. pp. 57-84.
  28. Zhang B., Liu P. Control and benchmarking of a 7-DOF robotic arm using Gazebo and ROS // PeerJ Computer Science. 2021. vol. 7.
  29. URL: [https://github.com/husarion/rosbot\\_description](https://github.com/husarion/rosbot_description) (accessed: 26.11.2021).
  30. Šuster P., Jadlovska A. Tracking Trajectory of the Mobile Robot Khepera II Using Approaches of Artificial Intelligence // Acta Electrotechnica et Informatica. vol. 11.
  31. Data acquisition software package for network training in Gazebo simulator URL: <https://github.com/urock/rosbot> (accessed: 26.11.2021).
  32. Software package for training a neural network model URL: [https://github.com/FastSense/robot\\_model\\_training](https://github.com/FastSense/robot_model_training) (accessed: 26.11.2021).
  33. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization //Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. IEEE, 1995. – vol. 4. pp. 1942–1948.
  34. Diveev A., Shmalko E. Evolutionary Computation for Synthesis of Control System for Group of Robots and Optimum Choice of Trajectories for their Movement // Proceedings of the OPTIMA-2017 Conference, Petrovac, Montenegro. 2017. pp. 158–165.



35. Diveev, A.I., Konstantinov S.V. Issledovanie prakticheskoj skhodimosti evolyucionnyh algoritmov optimal'nogo programmogo upravleniya kolesnym robotom [Study of the Practical Convergence of Evolutionary Algorithms for the Optimal Program Control of a Wheeled Robot]. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2018. vol. 57. no. 4. pp. 80–106. (In Russ.)

А.А. ЕРАШОВ, К.В. КАМЫНИН, К.Д. КРЕСТОВНИКОВ, А.И. САВЕЛЬЕВ  
**МЕТОД ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ ДВУМЯ РОБОТАМИ**

*Ерашов А.А., Камынин К.В., Крестовников К.Д., Савельев А.И. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами.*

**Аннотация.** Энергоемкость аккумуляторов, применяемых в качестве основного источника питания в мобильных робототехнических средствах, определяет время автономной работы робота. Для планирования выполнения группой робототехнических средств задач с точки зрения затрат времени актуально учитывать время, в течение которого заряжается аккумулятор каждого отдельного робота. При использовании беспроводной передачи энергии это время зависит от эффективности системы передачи энергии, а также от мощности передающей части системы, необходимой для пополнения энергоемкости. В настоящей работе предлагается метод оценки времени передачи энергетических ресурсов между двумя роботами с учетом данных параметров. Предлагаемый метод учитывает применение алгоритма конечного позиционирования роботов, оценку линейных смещений между роботами, включает вычисление эффективности, а также определение времени подзарядки с учетом параметров, полученных на предыдущих этапах метода. Алгоритм конечного позиционирования роботов использует алгоритмы обработки данных системы технического зрения робота для поиска реперных маркеров и определения их пространственных характеристик для обеспечения конечного позиционирования мобильных робототехнических платформ. Данные характеристики также применяются для определения линейных смещений между роботами, от которых зависит эффективность передачи энергии. Для ее определения в методе используется математическая модель энергетических характеристик системы беспроводной передачи энергии и полученные линейные смещения. На последнем этапе метода вычисляется время подзарядки аккумулятора мобильного робота с учетом данных с предыдущих этапов. Применение предложенного метода для моделирования позиционирования роботов в некотором наборе точек рабочего пространства позволит уменьшить временные затраты на зарядку аккумулятора робота при использовании беспроводной передачи энергии. В результате моделирования было определено, что передача энергетических ресурсов между роботами происходило с эффективностью в диапазоне от 58,11% до 68,22%, а также из 14 точек позиционирования были определены 3 с наименьшим временем передачи энергии.

**Ключевые слова:** мобильная робототехника, беспроводная передача энергии, оценка времени передачи энергии, позиционирование мобильных роботов, техническое зрение, ArUco-маркер.

**1. Введение.** Мобильные автономные роботы в настоящий момент широко применяются в быту (роботы-пылесосы), в задачах доставки, а также в роевой и модульной робототехнике. Зачастую в таких роботах устанавливаются аккумуляторные батареи, энергоемкость которых определяет время работы мобильной платформы. Для поддержания автономности группы робототехнических платформ актуальной является решение задачи

обеспечения достаточного уровня заряда аккумулятора для функционирования робота. Для решения данной проблемы в основном используются два подхода: передача энергии от зарядной станции контактным способом или беспроводным. Контактный способ требует высокой точности позиционирования, поскольку стыкуемые устройства необходимо сопрягать физически. Кроме того, открытые контакты могут быть повреждены при работе в среде с повышенным содержанием влаги или пыли. В связи с этим возможно применение специальных устройств сопряжения, однако их более сложная конструкция влечет за собой уменьшение надежности соединения и увеличение массогабаритных показателей робота. Отмеченных недостатков лишены беспроводные системы передачи энергии (БСПЭ).

БСПЭ активно применяются в системах беспроводного заряда электротранспорта [1], в мобильных устройствах и пользовательской электронике [2], а также в мобильных роботах [3].

Как было показано в [4], эффективность передачи энергии беспроводным способом зависит от относительного положения и ориентации приемной и передающей катушек. Она определяется показателем отношения принятой мощности к передаваемой. Следовательно, взаимное расположение частей системы будет влиять на время передачи энергии, что, в свою очередь, зависит от алгоритма конечного позиционирования роботов. Если есть возможность заряда аккумулятора мобильного робота от нескольких роботов группы, то расположение данных роботов будет определять, сколько энергоресурса останется у роботов после сближения устройств, что также влияет на общее время заряда. Таким образом, учет расположения точек передачи энергии, алгоритма конечного позиционирования и положения робототехнических средств после сближения роботов позволит выбрать наилучший вариант с точки зрения энергопотребления и времени заряда, сокращая тем самым время подготовки робота к решению задач. Это обуславливает актуальность исследований в направлении методов оценки времени передачи энергии мобильному роботу.

**2. Анализ способов конечного позиционирования мобильных роботов посредством различных сенсорных систем.** Процесс позиционирования наземных робототехнических платформ подразумевает определение координат точки конечного позиционирования одной платформы относительно другой для построения траектории движения, либо корректированию направления движения, если не используется планировщик маршрута до цели.

Координаты точки позиционирования для стыковки и направления движения к ней зачастую определяют с помощью различных датчиков.

В работе [5] для стыковки двух модульных роботов используются ИК-сенсоры и ИК-передатчики. Алгоритм позиционирования для стыковки базируется на поиске ИК-сигнала с передатчика, расположенного на другом роботе. Аналогичные датчики использовались в [6] для стыковки мобильного робота с зарядной станцией. В работе не рассмотрена оценка времени заряда аккумулятора. Применяемые ИК-датчики не позволяют определять угловые смещения.

Для контактного заряда аккумулятора мобильного робота предложен алгоритм позиционирования для стыковки с применением лазерного дальномера [7]. Данный сенсор установлен на подвижном роботе и позволяет определять направление движения и расстояние до зарядной станции, однако с его помощью проблемно оценить угловое смещение. В работе также отсутствует оценка времени заряда.

В алгоритмах конечного позиционирования робототехнических платформ [8, 9] используются данные с лидара для поиска объекта специальной формы, которую имеет зарядная станция. Предложенные алгоритмы заключаются в следующем: система технического зрения робота определяет маркер зарядной станции, затем он перемещается к точке позиционирования, выравнивается относительно зарядной станции, после чего стыкуется. Применение подхода с поиском зарядной станции определенной формы не исключает ситуаций, когда объект или совокупность объектов схожей формы могут быть приняты за объект стыковки.

Для поиска точки конечного позиционирования мобильных роботов также возможно применение систем технического зрения. Определение положения зарядной станции с помощью системы технического зрения и реперных маркеров ArpiTag рассмотрено в [10]. Область позиционирования разделена на две области, в одной из которых робот перемещается с использованием алгоритма ORB-SLAM, во второй – с применением данных о положении маркера, полученных после обработки изображений. Предложенный подход не содержит оценку времени заряда. В работе [11] положение и ориентацию точки конечного позиционирования к паллету с реперными маркерами относительно робота Pioneer 3-AT предложено определять с применением стереокамеры. Представленный алгоритм не полностью автономен: в экспериментах оператор удаленно управлял роботом для приближения к цели, после чего робот автоматически стыковался. В [12] для определения положения

мобильного робота относительно целевого объекта стыковки используются данные с карты глубины, получаемой с помощью Microsoft Kinect. В экспериментах для распознавания объекта стыковки его передняя часть была двуцветной: красной снизу, зеленой сверху. Такой подход может вызвать некорректное определение станции стыковки.

Системы технического зрения применяются также для стыковки и конечного позиционирования космических, надводных и подводных аппаратов. Для стыковки спутников предложено решение [13], в котором используется система стерео- и монозрения для определения положения и ориентации объекта стыковки по опорным маркерам и характерным точкам объекта стыковки. Аналогичный подход рассмотрен в работе [14], в которой предложен алгоритм стыковки макета микроспутника. Для условий микрогравитации в [15] предложен алгоритм позиционирования модулей SuperBot. Данные модули оснащены камерами и маркерами AprilTag для определения пространственных характеристик поверхности контакта модуля и маркера. Подобные подходы к определению точки позиционирования представляют интерес, поскольку позволяют определять положение и ориентацию поверхности объекта стыковки, на которой установлен маркер.

Применение алгоритмов позиционирования подводных и надводных роботов накладывает ограничения на способы определения положения цели, определяемые условиями окружающей среды. Так, алгоритм конечного позиционирования по L-образному соединению световых излучателей [16] применим только в области подводной робототехники и, как отмечают авторы, в комплексной подводной среде предлагаемый алгоритм не идеален для позиционирования с большим продольным углом наклона. В [17] представлен алгоритм конечного позиционирования мобильного морского робота с надводной станцией обработки и сбора данных. Робот оснащен Microsoft Kinect и индукционными зарядными катушками для беспроводной передачи энергии. Верхняя крышка станции покрыта отражающей инфракрасное излучение пленкой для определения положения робота с помощью обработки изображений с камеры. Эксперименты показали, что возможно некорректное определение положения станции при появлении на изображении ярких участков. Также в работе не приведена оценка времени заряда. Система стыковки сферического робота-амфибии на базе бинокулярной камеры рассматривается в [18], с помощью которой получают два вида изображений – цветное и карта глубины. В системе технического зрения робота используется

распознавание стыковочного гнезда, после чего применяется алгоритм Kernelized Correlation Filters [19] для отслеживания положения целевого объекта. Далее робот перемещается так, чтобы положение объекта на изображении было по центру, при этом расстояние стыковки составляет не менее 200 мм. Эксперименты по стыковке на меньшей дистанции не проводились.

Комбинированное применение различных сенсоров позволит уточнять взаимное положение и ориентацию стыкуемых объектов, однако использование различных датчиков приводит к увеличению числа проводов и не всегда целесообразно по причине возможных ограничений массогабаритных показателей мобильных платформ. Комбинирование ИК-датчика и лидара рассмотрено в [20], где предложена система заряда аккумулятора мобильного робота от неподвижной зарядной станции. Комбинирование УЗ и ИК-датчиков для стыковки мобильного робота с зарядной станцией предложено в [21]. ИК-сенсоры предложено использовать для грубого позиционирования, для режима точного позиционирования используются УЗ-сенсоры и передатчики. В рассмотренных работах не обсуждались вопросы оценки времени заряда для различных положений точек позиционирования в пространстве. Для определения угловых смещений может потребоваться несколько таких датчиков. Помимо УЗ и ИК датчиков для определения направления движения мобильной платформы в условиях низких акустических шумов возможно применение алгоритмов обработки звуковых колебаний. Так, в [22] представлена система поиска и отслеживания направления зарядной станции на основе источника звука и данных с системы технического зрения. Данное решение имеет ограниченное применение, поскольку оно использует акустический подход для поиска направления движения робота и не позволяет оценить смещения стыкуемых объектов. Комбинирование технического зрения с ИК-датчиками рассмотрено в [23]. Для определения направления движения предложено использовать QR-коды в качестве маркеров. Алгоритм позиционирования заключается в движении робота так, чтобы центр QR-кода совпадал с центром изображения. В маркере кодируется лишь необходимая информация, чтобы робот позиционировался по маркерам с определенным идентификатором.

Для определения точки конечного позиционирования во многих исследованиях было использовано техническое зрение, что при достаточном уровне освещения представляется более предпочтительным вариантом по сравнению с УЗ и ИК-датчиками. Это обусловлено тем, что датчики имеют более ограниченный рабочий

диапазон по сравнению с диапазоном различных камер со специальными маркерами, ввиду чего, при условии подвижности стыкуемых объектов, необходимо использовать несколько датчиков для уменьшения зон нечувствительности сенсорной системы в рабочем пространстве мобильного робота. Кроме того, применение технического зрения также позволяет определять и ориентацию объектов относительно друг друга, что также является преимуществом перед УЗ и ИК-сенсорами. Применение подходов определения точки позиционирования с применением излучающих свет или звук источников затруднено из-за необходимости работы системы в специфических условиях (плохая освещенность, низкий уровень акустических шумов окружающего пространства). В системах технического зрения возможно использование свободного программного обеспечения для определения пространственных характеристик маркеров относительно камеры, а также для калибровки используемой камеры. Возможно применение таких систем технического зрения, как Microsoft Kinect, однако стоимость и массогабаритные показатели подобных систем могут быть сравнительно больше, чем те же параметры системы, состоящей из камеры и реперных маркеров. Таким образом, в настоящей работе для поиска точки конечного позиционирования предлагается использовать систему технического зрения на базе камеры и ArUco-маркеров, что позволит использовать сравнительно небольшое число сенсоров для определения положения и ориентации между роботами, а также направление движения. Выбор данных маркеров обусловлен тем, что их распознаваемость является одной из лучших по точности [24], возможностью использования на открытой местности, а также тем, что для разработки программного обеспечения можно использовать доступную библиотеку OpenCV с широким функционалом. Применение беспроводного способа передачи энергии [25, 26], как было отмечено ранее, не требует использования дополнительных датчиков для достижения высокой точности позиционирования.

Среди рассмотренных работ есть исследования, в которых рассматривалась оптимизация времени позиционирования или энергопотребления в процессе сближения роботов. Однако в большинстве работ не уделяется достаточного внимания к оценке времени заряда аккумулятора мобильного робота для различных положений точки конечного позиционирования в рабочем пространстве. Данная проблема является актуальной, поскольку ее решение позволит оптимизировать время выполнения задач за счет

выбора точек конечного позиционирования, в которых передача энергии будет происходить с наиболее высокой эффективностью.

**3. Постановка задачи.** Целью данной работы является разработка метода оценки времени передачи энергии посредством БСПЭ между двумя роботами для заряда аккумуляторной батареи одного из них. Задача проводимого исследования формулируется следующим образом. Даны два робота: заряжающий робот и робот-рабочий, который выполняет задачу. Оба робота имеют собственный автономный источник питания и БСПЭ. В процессе выполнения задачи у робота-рабочего уровень заряда батареи снижается. При достижении порогового значения необходимо восполнить заряд аккумуляторной батареи робота-рабочего для продолжения выполнения задачи. Для этого осуществляется позиционирование между роботом-рабочим и роботом-заряжающим и последующая передача энергии между ними посредством БСПЭ. Следует отметить, что процесс заряда батареи робота-рабочего может быть полным или частичным. В данной работе рассматривается частичное пополнение уровня заряда аккумулятора робота-рабочего за счет передачи энергии от заряжающего робота. В зависимости от сенсорной системы робота, исполнительных устройств, а также рельефа местности, при позиционировании для передачи энергии между роботами могут возникать отклонения от идеального взаимного положения. Данные смещения главным образом зависят от того, как алгоритм конечного позиционирования робототехнических средств выполняется в условиях локальных неровностей. Как отмечено выше, смещения между роботами при передаче энергии посредством БСПЭ влияют на эффективность ее работы и передаваемую мощность. Следовательно, для оценки времени передачи энергии необходимо определить эффективность и передаваемую мощность БСПЭ после окончания позиционирования на основе данных о достигнутом взаимном положении роботов.

**4. Метод оценки времени передачи энергетических ресурсов между двумя роботами.** Разработанный метод оценки времени заряда аккумулятора робототехнического средства беспроводным способом состоит из следующих этапов:

1. Выполнение алгоритма конечного позиционирования робототехнических платформ.
2. Оценка смещений между платформами.
3. Расчет эффективности передачи энергии на основе смещений, полученных в п.2.



4. Определение времени заряда с учетом п.3 и энергетических параметров БСПЭ заряжающего робота.

Для сближения роботов в окрестности точки конечного позиционирования и дальнейшей оценки смещений по результатам проведенного анализа разработан алгоритм, использующий планирование траектории, а также алгоритмы обработки изображений для поиска ArUco-маркеров и получения их положения и ориентации относительно системы отсчета камеры [27]. Планирование траектории до точки конечного позиционирования предлагается осуществлять на базе алгоритма LRLHD-A\* [28]. Для увеличения точности определения относительной ориентации и положения роботов в окрестности точки конечного позиционирования предлагается использовать два ArUco-маркера на передней части робота-рабочего. Разработанный алгоритм начинает свою работу после того, как система технического зрения определяет маркеры, затем активируется процесс корректирования ориентации заряжающего робота относительно точки конечного позиционирования. При этом также возможно обновление глобальной траектории движения. После конечного позиционирования по пространственным характеристикам ArUco-маркеров определяются линейные смещения между роботами (второй этап), затем результат передается на третий этап предлагаемого метода.

Расчет эффективности передачи энергии производится с учетом полученных линейных смещений между приемной и передающей частями БСПЭ на основании модели энергетических характеристик БСПЭ [4].

На четвертом этапе метода вычисляется время передачи энергии на базе полученных ранее результатов, а также данных о мощности передачи энергии и необходимой для пополнения уровня заряда аккумулятора.

Следует отметить, что для ориентирования роботов в пространстве можно использовать удаленное вычислительное устройство, собирающее по беспроводному каналу связи все необходимые данные. На этом же устройстве возможен анализ этих данных и определение роботов, которых можно использовать для перераспределения энергии в группе роботов. Отмеченный вопрос является отдельной алгоритмической задачей, выходящей за рамки данной статьи.

Предложенный метод целесообразно применять для получения набора оценок времени заряда по разному количеству точек конечного позиционирования с помощью моделирования. В результате моделирования процесса позиционирования и применения метода

оценки времени передачи энергии можно получить набор данных из оценок времени, на основе которых возможен поиск точек конечного позиционирования, которые обеспечат сокращение времени процесса заряда аккумулятора робота-рабочего. Далее подробнее рассмотрены этапы предложенного метода.

**4.1. Алгоритм конечного позиционирования мобильных автономных роботов.** Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ на основе ArUco-маркеров приведен на рисунке 1. Предлагаемый алгоритм предназначен для управления процессом позиционирования заряжающего робота относительно робота-рабочего на этапе движения, когда робототехнические средства находятся на расстоянии до 1 м при размере маркеров 45 мм × 45 мм.

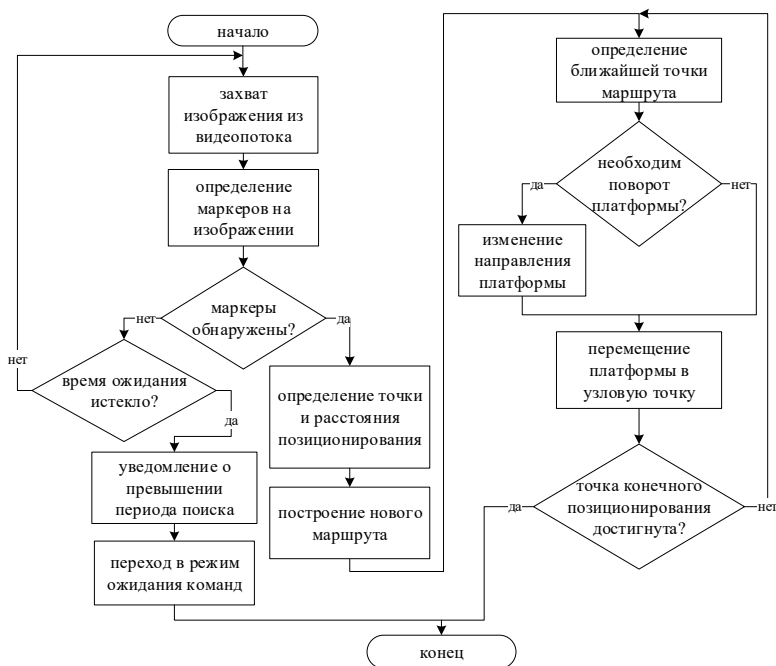


Рис. 1. Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ на основе ArUco-маркеров

Полагается, что в самом начале процесса позиционирования роботы могут находиться на большем расстоянии, чем 1 м. Поэтому в настоящей работе допускается, что для определения положения можно воспользоваться внешней навигационной системой, которая основана,

например, на беспроводном взаимодействии роботов с удаленным вычислителем. Положения всех роботов считываются этим удаленным устройством, затем подвергаются дополнительному анализу, например, с участием карты высот.

Предлагаемый алгоритм, как часть метода оценки времени передачи энергоресурсов, начинает свою работу в тот момент времени, когда система технического зрения определяет маркеры. До этого момента заряжающий робот перемещается по глобальной траектории.

Если два ArUco-маркера с заранее известными идентификаторами не были определены на изображении, то поиск повторяется снова до тех пор, пока не будет превышено заданное время ожидания обнаружения маркеров. При этом алгоритм уведомляет о превышении времени обнаружения, после чего заряжающий робот входит в режим ожидания новых команд.

В случае успешного определения ArUco-маркеров вычисляются координаты точки конечного позиционирования в трехмерном пространстве. Для этого сперва необходимо определить векторы сдвига каждого маркера в пространстве относительно системы отсчета  $C$ , связанной с камерой, которая неподвижно закреплена на заряжающем роботе. На рисунке 2 показаны данные векторы  ${}^C_{M1}P$  и  ${}^C_{M2}P$ , направленные в точки  $M1$  и  $M2$  соответственно, обозначающие геометрический центр каждого ArUco-маркера. Посредством библиотеки компьютерного зрения OpenCV по изображениям и параметрам камеры (коэффициенты дисторсии и др.) определяются координаты векторов сдвига  ${}^C_{M1}P = (x_{M1}, y_{M1}, z_{M1})^T$  и  ${}^C_{M2}P = (x_{M2}, y_{M2}, z_{M2})^T$  относительно системы отсчета камеры  $C$ . Далее, чтобы найти координаты средней точки  $N$  между маркерами в системе отсчета камеры, можно вычислить половину от суммы координат векторов. Тогда полученный вектор  ${}^C_N P = (x_N, y_N, z_N)^T$  (1) будет указывать на середину между центрами двух маркеров в пространстве.

$${}^C_N P = \begin{pmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_{M1} + x_{M2} \\ y_{M1} + y_{M2} \\ z_{M1} + z_{M2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Для вычислений была введена прямоугольная система координат, поскольку именно в таком представлении используемая

библиотека OpenCV позволяет определить пространственные характеристики центров маркеров: ориентацию и положение.

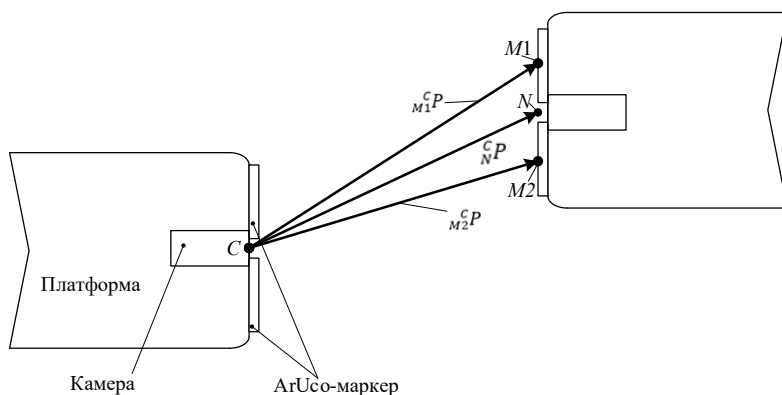


Рис. 2. Определение координат точки конечного позиционирования

Далее с учетом дополнительных данных о взаимном положении робототехнических платформ обновляется траектория движения заряжающего робота до точки конечного позиционирования на основе алгоритма LRLHD-A\* [28]. Применение данного алгоритма позволит определить энергоэффективный маршрут от текущего положения до целевого. Работа алгоритма успешно приведена в [28]. Полученная траектория сглаживается с применением алгоритма CSA [29] для достижения плавности перемещения мобильного робототехнического средства.

По сгенерированной траектории определяется ближайшая точка (вершина полученного маршрута), к которой затем перемещается заряжающий робот. Данные об ориентации и положении, полученные с помощью технического зрения, позволяют уточнить направление движения заряжающего робота к точке конечного позиционирования и корректировать его при значительном отклонении, которое задается отдельно. Движение продолжается, пока заряжающий робот не достигнет точки конечного позиционирования с заданной точностью. В алгоритме это реализовано циклически, проверяя, достиг заряжающий робот точки конечного позиционирования или нет: если нет, то определяется ближайшая точка траектории, к которой затем направляется робот. Если система технического зрения перестанет определять маркеры, то заряжающий робот будет перемещаться по глобальной траектории. В таком случае это может повлиять на

точность конечного позиционирования, если маркеры так и не будут обнаружены.

При достижении точки конечного позиционирования параллельность между платформами достигается за счет использования данных об ориентации заряжающего робота относительно точки позиционирования. Для этого предлагается использовать матрицы поворота каждого маркера, которые так же, как и векторы сдвига, определяются с помощью системы технического зрения. В соответствии с приведенными в [30] определениями, связанными с матрицами поворота, соответствующие координатные оси двух систем отсчета являются сонаправленными при нулевых значениях углов поворота одной системы отсчета относительно другой. С учетом этого, если, например, ориентация задается через углы Эйлера, то матрица поворота (2) становится единичной (3):

$$R = \begin{pmatrix} c\alpha s\gamma - s\alpha c\beta s\gamma & -c\alpha s\gamma - s\alpha c\beta c\gamma & s\alpha s\beta \\ s\alpha c\gamma + c\alpha c\beta s\gamma & -s\alpha s\gamma + c\alpha c\beta c\gamma & -c\alpha s\beta \\ s\beta s\gamma & s\beta c\gamma & c\beta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $c x = \cos x$ ,  $s x = \sin x$ ,  $x \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$ ,

$$R|_{\alpha=0, \beta=0, \gamma=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Тогда параллельность платформ можно проверять по тому признаку, что матрицы поворота стремятся к единичной. Ориентацию и относительное положение платформ необходимо изменять для достижения параллельности платформ при конечном позиционировании, данная информация используется в дальнейшем расчете эффективности передачи энергии с помощью беспроводной системы.

**4.2. Расчет эффективности передачи энергии.** В соответствии с приведенными в [4] уравнениями по продольному смещению  $L$  и поперечному смещению  $H$  (рисунок 3) определяют показатели  $\eta_L$ ,  $\eta_H$  эффективности передачи энергии, соответственно, при продольном и поперечном смещениях.

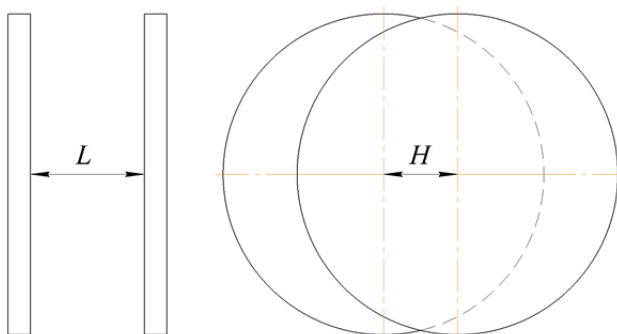


Рис. 3. Определение смещений между приемной и передающей катушками БСПЭ

Итоговая эффективность вычисляется путем перемножения полученных показателей при продольном и поперечном смещениях (3):

$$\eta_s = \eta_L \cdot \eta_H. \quad (3)$$

Уравнения, представленные в [4], были получены по характеристикам реального прототипа. Это позволяет с высокой точностью составлять прогнозы эффективности на основе смещений. Получение аналитических выражений требует, во-первых, преобразования множества нелинейных зависимостей, которые присутствуют в БСПЭ, во-вторых, дополнительных исследований и сравнения с характеристиками прототипа.

**4.3. Оценка времени передачи энергии.** Время заряда аккумулятора мобильного робота-рабочего в данном случае зависит от итогового показателя эффективности  $\eta_s$ , остаточного заряда типа аккумулятора, а также от мощности зарядного устройства.

Значение остаточного заряда аккумулятора  $C_t$  вычисляется по формуле (4):

$$C_t = C \left( 1 - \frac{p}{100} \right), \quad (4)$$

где  $C$  – полная энергоемкость в Вт·ч аккумулятора робота-рабочего;  $p$  – значение энергоемкости аккумулятора в процентах, при которой необходим заряд.

Передаваемая мощность  $P_{1(max)}$  может быть определена посредством измерения или расчета, итоговый показатель эффективности  $\eta_s$  является расчетным параметром в соответствии с п.3.2. Тогда после определения  $C_t$  можно найти время передачи энергии для достижения требуемого уровня заряда аккумулятора. В общем виде зависимость данного времени от упомянутых параметров представляется как (5).

$$t_E = f(P_{1(max)}, \eta_s, C_t). \quad (5)$$

Форма характеристики зависимости времени заряда может варьироваться при изменении любого параметра. Форма кривой заряда аккумулятора зависит также от применяемых алгоритмов, реализуемых специализируемыми контроллерами или иными схемотехническими решениями, которые в данной работе не рассматриваются.

**5. Эксперименты.** Для оценки времени заряда предлагаемый метод был применен в серии экспериментов в симуляционной среде Gazebo. В качестве мобильных платформ использовались две модели роботов Pioneer 3-AT, на одной из которых была установлена камера, на второй – два AgUco-маркера. Алгоритм конечного позиционирования мобильных платформ реализован на языке программирования Python, для распознавания маркеров на изображении с камеры использована библиотека OpenCV. Глобальная траектория движения заряжающего робота до точки конечного позиционирования генерируется на основе алгоритма LRLHD-A\* [28].

Также принимаются следующие допущения: система управления каждым роботом с помощью внешней навигационной системы может определить положение роботов друг относительно друга, заряжающий робот обладает достаточным уровнем заряда аккумулятора для передачи энергии роботу-рабочему. Делалось допущение, что зависимость (5) линейная:

$$t_E = \frac{100C_t}{P_{1(max)}\eta_s}. \quad (6)$$

В числителе (6) множитель 100 используется, когда показатель эффективности  $\eta_s$  задается в процентах.

В ходе экспериментов использовалась карта высот модели рабочего пространства из библиотеки моделей симулятора Gazebo. На

этом пространстве было задано 14 случайных точек с различными координатами. В окрестности данных точек устанавливался заряжающий робот и робот-работчий, после чего проводилась симуляция позиционирования двух платформ (рисунок 4). В соответствии с предложенным методом, после позиционирования определялось относительное положение платформ, затем вычислялся показатель эффективности. На основе полученных данных определялось время заряда.

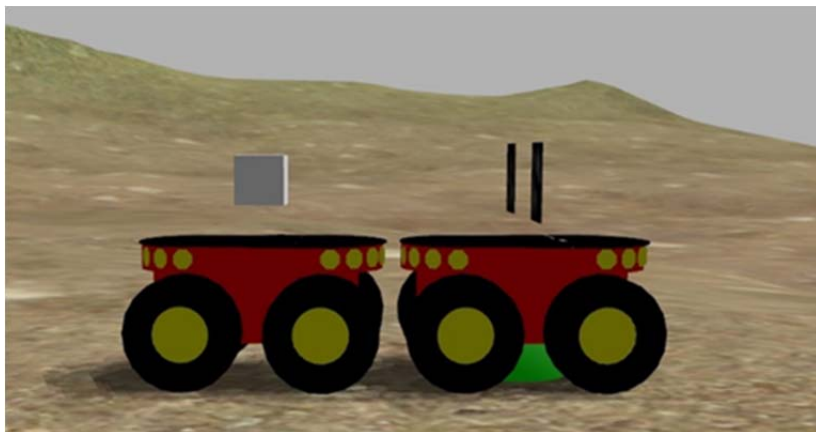


Рис. 4. Конечное позиционирование двух мобильных платформ Pioneer 3-AT (платформа слева – заряжающий робот, оснащенная камерой; платформа справа – робот-работчий)

В симуляции позиционирования платформ в соответствии с предложенным алгоритмом остановка роботов производилась в момент, когда расстояние между камерой и маркерами становилось менее 0,54 м. Выбор данного порогового значения обуславливается двумя факторами:

- длина мобильной платформы;
- расположение камеры и маркеров.

Длина мобильной платформы составляет 0,508 м [31].

Камера и маркеры на роботах расположены по центру каждой мобильной платформы, таким образом, минимальное возможное расстояние между камерой и маркерами в момент касания платформ составляет 0,508 м. В качестве расстояния, учитывающего толщину приемной и передающей частей БСПЭ, было принято значение 0,022 м. Таким образом, в момент, когда расстояние между камерой и маркерами равно 0,54 м, платформы находятся на расстоянии от 0 до



0,01 м для того, чтобы эффективность была близка к максимальному значению. Возможный запас по расстоянию в 0,01 м был принят для избегания столкновений платформ при остановке.

На рисунке 5 приведен вид с камеры заряжающего робота. В левом верхнем углу рисунка 5 показано расстояние до центральной точки между маркерами, а также расстояние до левого и правого маркеров соответственно. Кроме того, на маркерах и центральной точке изображено направление осей привязанных систем отсчета, которые наглядно демонстрируют их ориентацию в пространстве.

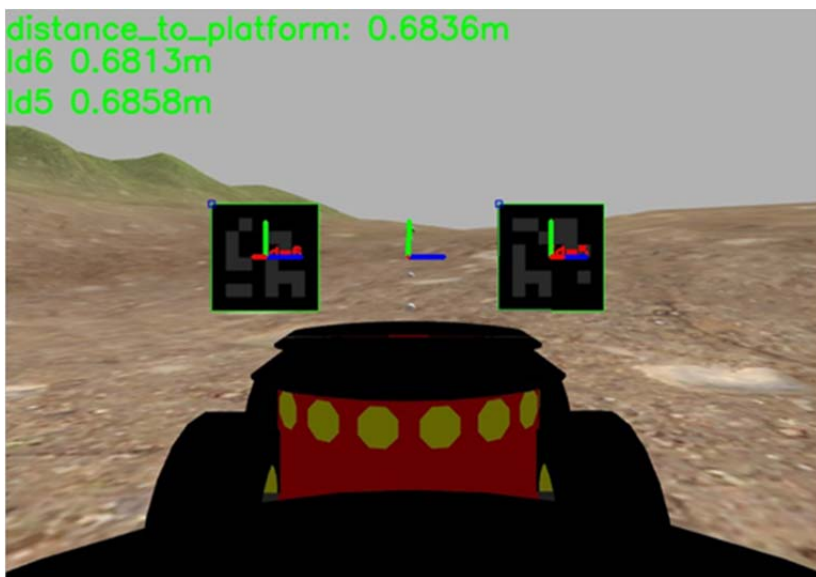


Рис. 5. Вид с камеры заряжающего робота

Для вычисления эффективности БСПЭ были приняты следующие величины:

- максимальная эффективность: 80%
- диаметр катушки: 0,08 м;
- мощность нагрузки: 15 Вт;
- мощность передающей катушки: 20 Вт.

В таблице 1 приведены средние расчетные значения эффективности и смещений по каждой точке. В таблице 2 также показаны углы наклона поверхности относительно горизонта в точках конечного позиционирования роботов. Значения, приведенные в

данных таблицах и на изображениях далее, определялись с точностью до 15 знака.

Таблица 1. Расчетные данные с экспериментов по конечному позиционированию роботов

№ точки	Продольное смещение, м	Поперечное смещение, м	Эффективность, %	Абсолютное отклонение от $\eta_{max}$ , %
1	0,0175	0,0206	63,39	16,61
2	0,0182	0,0127	66,29	13,71
3	0,0177	0,0154	65,97	14,03
4	0,0164	0,0187	64,67	15,33
5	0,0168	0,0172	66,15	13,85
6	0,0169	0,0127	67,14	12,86
7	0,0181	0,0062	67,76	12,24
8	0,0182	0,0045	68,22	11,78
9	0,0177	0,0083	67,84	12,16
10	0,0180	0,0108	66,82	13,18
11	0,0164	0,0286	61,91	18,09
12	0,0175	0,0298	58,11	21,89
13	0,0158	0,0239	63,78	16,22
14	0,0184	0,0296	60,58	19,42

Наименьшее отклонение от максимальной эффективности, составившее в среднем 11,78%, получилось в точке №8, при этом видно, что продольное смещение между приемной и передающей частями катушек не является наименьшим среди других расчетных значений, на итоговое значение эффективности в большей степени повлияло поперечное смещение, которое среди экспериментов в среднем получилось меньше, чем в других точках. Это обусловлено тем, что в точке №8 была наиболее ровная поверхность позиционирования. Также это подтверждается значениями углов наклона поверхностей позиционирования из таблицы 2.

Таблица 2. Углы наклона поверхностей в точках конечного позиционирования

№ точки	Угол наклона поверхности, град	№ точки	Угол наклона поверхности, град
1	17,42	8	0
2	12,05	9	1,12
3	14,53	10	10,01
4	14,89	11	18,77
5	12,65	12	19,99
6	6,83	13	17,08
7	6,59	14	19,33

В точке позиционирования №8 поверхность имеет наклон  $0^\circ$ , то есть конечное позиционирование платформ происходило на ровной поверхности. Ближайшее значение угла наклона поверхности к точке №8 имеет точка №9. Также можно наблюдать, что разница между наклонами поверхностей позиционирования несопоставима с разницей изменения эффективности в этих точках. Это может быть обусловлено наличием локальных неровностей в окрестности точки позиционирования мобильных роботов.

Алгоритм конечного позиционирования, как составляющее метода оценки времени заряда аккумулятора, позволил в среднем получить отклонение от  $\eta_{max}$  равное примерно 15%.

На рисунке 6 приведены средние значения эффективности и смещений по каждому эксперименту.

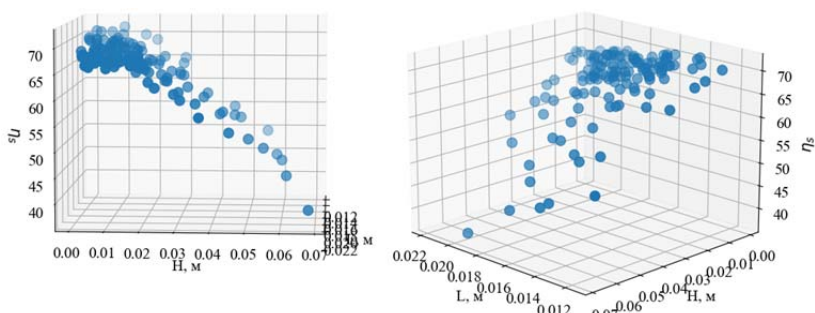


Рис. 6. Графическое представление расчетных значений эффективности в зависимости от смещений

Полученная зависимость имеет схожий нелинейный характер, что и характеристики, представленные в [4]. По приведенному рисунку видно, что изменение поперечного смещения меньше сказывается на эффективности, чем изменение продольного смещения между приемной и передающей катушками.

Также с помощью технического зрения и ArUco-маркеров были определены продольные и поперечные углы смещения катушек относительно друг друга. Третий угол, который отвечает за поворот относительно оси симметрии катушки, не должен влиять на эффективность передачи энергии, поскольку в БСПЭ ориентация магнитного поля приемной катушки повторяет ориентацию поля передающей, значит, изменение данного угла не должно значительно сказываться на эффективности. Диаграмма со средними величинами эффективности, соответствующими каждой точке, приведена на

рисунке 7. Стоит отметить, что данные углы были учтены при расчете эффективности.

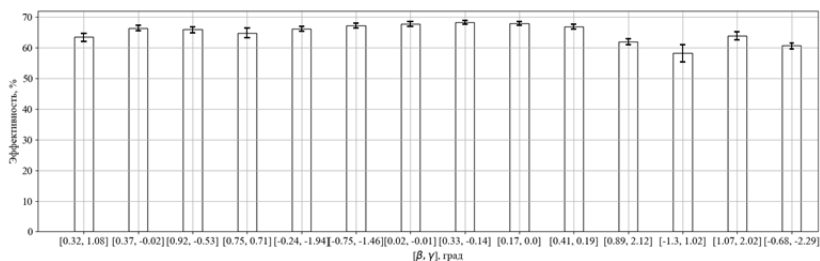


Рис. 7. Диаграмма со средней расчетной эффективностью и угловыми смещениями

Из представленной выше диаграммы следует, что заряжающий робот останавливался со средним значением продольного углового смещения  $0,05^\circ$ , в случае с поперечным угловым смещением среднее значение составило  $0,16^\circ$ . При этом максимальное продольное угловое смещение среди всех экспериментов составило  $2,58^\circ$ , поперечное –  $4,86^\circ$ .

Также была произведена оценка времени заряда в каждом эксперименте по всем 14 точкам. По формуле (6) и усредненным данным, полученным после симуляций, было определено среднее время заряда робота-рабочего для 14 вариантов точек, что приведено в виде диаграммы на рисунке 8. Для расчетов было принято, что  $C_t = 70$  Вт·ч,  $P_{1(max)} = 20$  Вт. Отметим, что величина  $p$  из формулы (4) при этом была принята 60%, следовательно, робот-рабочий не является полностью обесточенным.

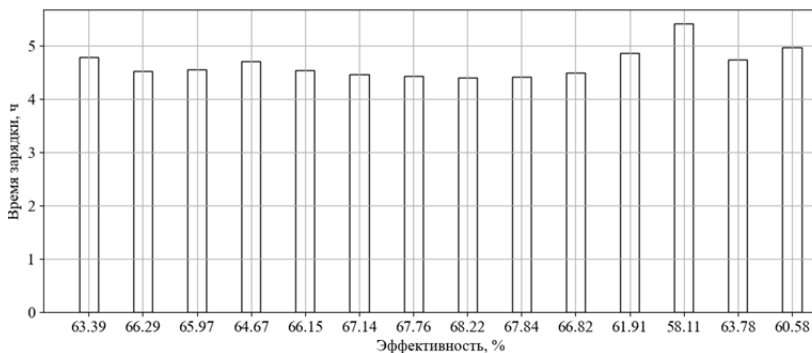


Рис. 8. Диаграмма с прогнозом времени заряда на основании расчетных значений эффективности БСПЭ

По представленной выше диаграмме с помощью применения разработанного метода можно предварительно оценить, сколько времени необходимо для заряда аккумулятора мобильного робототехнического средства. Так, по диаграмме видно, что может потребоваться более 5 часов для заряда с учетом того, что заряжающий робот двинется из точки №12, при эффективности 58,11%. Наиболее быстро процесс заряда может пройти в точках №7-9, в данных точках в среднем были получены наибольшие значения эффективности ввиду отсутствия значительных локальных неровностей поверхности конечного позиционирования.

Таким образом, разработанный метод позволяет предварительно оценить эффективность передачи энергетических ресурсов и в дальнейшем уменьшить время заряда робота-рабочего путем выбора точек конечного позиционирования, в которых значительно (более, чем на 5%) отличается эффективность передачи энергии. Кроме того, с помощью разработанного метода возможно корректирование положений робототехнических средств после позиционирования.

**6. Заключение.** Предложенный в работе метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами основан на применении алгоритма конечного позиционирования данных роботов, а также на определении показателя эффективности передачи энергии в соответствии с моделью энергетических характеристик БСПЭ [4]. С помощью разработанного алгоритма конечного позиционирования заряжающий робот сближается с роботом-рабочим для передачи энергетических ресурсов. Использование двух ArUco-маркеров на роботе-рабочем для взаимного позиционирования роботов позволяет уточнить относительное положение и определить ориентацию центра передней части заряжающего робота относительно точки конечного позиционирования.

Полученные после экспериментов в симуляторе Gazebo продольные смещения можно уменьшить путем сокращения расстояния остановки, которое для экспериментов было взято 0,01 м. При этом потребуются корректирование закона управления для обеспечения большего быстродействия при остановке робота, чтобы избежать возможных столкновений. Также для экстренной остановки заряжающего робота можно воспользоваться дополнительными датчиками, которые позволят определять столкновение робототехнического средства с препятствиями. Увеличение поперечного смещения между мобильными роботами может быть вызвано как возможными ошибками алгоритма движения

робототехнического средства, так и локальными неровностями поверхности, на которой позиционируются роботы.

По полученным оценкам времени заряда аккумулятора было выявлено, что в зависимости от неровностей местности в той или иной точке конечного позиционирования мобильных роботов может значительно отличаться эффективность передачи энергии беспроводным способом. Предложенный метод оценки позволяет определять время и показатель эффективности передачи энергии как на основе данных, полученных в реальных условиях позиционирования роботов, так и на основе моделирования, благодаря чему возможно планирование процесса перераспределения энергетических ресурсов в группе роботов, состоящей из двух и более агентов. Также можно отметить, что применение подхода с определением локальных неровностей посредством анализа карты глубины может позволить улучшить работу метода за счет дополнительной возможности корректирования положения робота при позиционировании.

Кроме того, после позиционирования мобильных роботов возможно повторное использование предложенного метода для корректирования положения между робототехническими платформами и увеличения эффективности передачи энергетических ресурсов.

### Литература

1. Rim C.T., Mi C. *Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices* // John Wiley & Sons. 2017. 632 p.
2. Riehl P.S., et al. *Wireless power systems for mobile devices supporting inductive and resonant operating modes* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. vol. 63. no. 3. pp. 780–790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.
3. Cortes I., Kim W. *Autonomous Positioning of a Mobile Robot for Wireless Charging Using Computer Vision and Misalignment-Sensing Coils* // 2018 Annual American Control Conference (ACC). 2018. pp. 4324–4329. <https://doi.org/10.23919/ACC.2018.8431723>.
4. Krestovnikov K., Erashov A. *Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils* // Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31).
5. Won P., Biglarbegian M., Melek W. *Development of an effective docking system for modular mobile self-reconfigurable robots using extended kalman filter and particle filter* // Robotics. 2015. vol. 4. no1. pp. 25–49. <https://doi.org/10.3390/robotics4010025>.
6. Song G., Wang H., Zhang J., Meng T. *Automatic docking system for recharging home surveillance robots* // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2011. vol. 57. no. 2. pp. 428–435. <https://doi.org/10.1109/TCE.2011.5955176>.
7. Su K.L., Liao Y.L., Lin S.P., Lin S.F. *An interactive auto-recharging system for mobile robots* // International Journal of Automation and Smart Technology. 2014. vol. 4. no. 1. pp. 43-53. <http://dx.doi.org/10.5875/ausmt.v4i1.197>.

8. Vongbunyong S., Thamrongaphichartkul K., Worrasittichai N., Takutrua A. Automatic precision docking for autonomous mobile robot in hospital logistics case-study: battery charging // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2021. vol. 1137. no. 1. pp. 012060. doi:10.1088/1757-899X/1137/1/012060.
9. Zhang X., Li X., Zhang X. Automatic Docking and Charging of Mobile Robot Based on Laser Measurement // 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2021. vol. 5. pp. 2229–2234. <https://doi.org/10.1109/IAEAC50856.2021.9390995>.
10. Guangrui F., Geng W. Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment // 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). 2017. pp. 79-83. <https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291357>.
11. Wang Y., Shan M., Yue Y., Wang D. Autonomous target docking of nonholonomic mobile robots using relative pose measurements // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. vol. 68. no. 8. pp. 7233–7243. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3001805>.
12. Barbosa J., et al. Design and validation of an RGB-D based localization system-integration in a docking system // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2015. vol. 80. no. 3. pp. 423–440. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0181-7>.
13. Uyar Y.E.A.M.N., et al. Developing and modelling of satellite docking algorithm // 2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2017. pp. 465–471. <https://doi.org/10.1109/RAST.2017.8002987>.
14. Ivanov D.S., Koptev M.D., Tkachev S.S., Shachkov M.O. Docking algorithm for flexible microsatellite mock-ups on planar air-bearing testbench // Keldysh Institute Preprints. 2017. no. 110. 24 p. <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-110-e>.
15. Barrios L., Collins T., Kovac R., Shen W.M. Autonomous 6D-docking and manipulation with non-stationary-base using self-reconfigurable modular robots // 2016 IEEE/R SJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. pp. 2913–2919. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759451>.
16. Yan Z., et al. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array // IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 72567–72576. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917791>.
17. Babić A., Mandić F., Vasiljević G., Mišković N. Autonomous docking and energy sharing between two types of robotic agents // IFAC-PapersOnLine. 2018. vol. 51. no. 29. pp. 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.453>.
18. Guo S., et al. Binocular Camera-based a Docking System for an Amphibious Spherical Robot // 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2018. pp. 1621–1626. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2018.8484518>.
19. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-speed tracking with kernelized correlation filters // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2014. vol. 37. no. 3. pp. 583–596. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2345390>.
20. Dombia M., Cheng X., Havyarimana V. An auto-recharging system design and implementation based on infrared signal for autonomous robots // 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). 2019. pp. 894–900. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2019.8813317>.
21. Zhang J., Cai L., Chu Y., Zhou Q. A Sectional Auto-docking Charging Control Method for the Mobile Robot // 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2019. pp. 330–335. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816514>.

22. Luo R.C., Huang C.H., Huang C.Y. Search and track power charge docking station based on sound source for autonomous mobile robot applications // 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010. pp. 1347–1352. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5649993>.
23. Quilez R., Zeeman A., Mitton, N., Vandaele J. Docking autonomous robots in passive docks with Infrared sensors and QR codes // International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TridentCOM). 2015. 10 p.
24. Kalaitzakis M., et al. Experimental comparison of fiducial markers for pose estimation // 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2020. pp. 781–789. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213977>.
25. Крестовников К.Д., Черских Е.О. Шабанова А.Р. Схемотехнические и конструктивные решения на основе синхронного выпрямителя для беспроводной системы передачи энергии // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. №4. С. 15. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.018>.
26. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics // Radioengineering. 2021. vol. 30. no. 1. pp. 142–149. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>.
27. Сайт с исходными файлами библиотеки OpenCV для языка программирования Python. URL: [github.com/opencv/opencv-python](https://github.com/opencv/opencv-python) (дата обращения 22.09.2021).
28. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots // Springer, Cham: International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2020. pp. 319–330. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3>.
29. Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 24. №4. С. 107–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.
30. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. – Pearson Education India, 2009. 408 p.
31. Спецификация мобильной платформы Pioneer 3-AT. URL: [www.generationrobots.com/media/Pioneer3AT-P3AT-RevA-datasheet.pdf](http://www.generationrobots.com/media/Pioneer3AT-P3AT-RevA-datasheet.pdf) (дата обращения 22.09.2021).

**Ерашов Алексей Алексеевич** — младший научный сотрудник, лаборатория технологий больших данных социкиберфизических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: разработка алгоритмов управления робототехническими средствами с применением технического зрения и машинного обучения. Число научных публикаций — 9. [erashov.a@iias.spb.su](mailto:erashov.a@iias.spb.su); 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

**Камынин Константин Валерьевич** — программист, лаборатория автономных робототехнических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: анализ данных и распознавание образов, машинное обучение в интеллектуальных системах. Число научных публикаций — 0. [konstvictorovich@mail.ru](mailto:konstvictorovich@mail.ru); 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

**Крестовников Константин Дмитриевич** — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: разработка модели и алгоритмов для распределения энергетических ресурсов в рое



робототехнических средств путем двунаправленной беспроводной передачи энергии. Число научных публикаций — 25. k.krestovnikov@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

**Савельев Антон Игоревич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: разработка математического обеспечения, кроссплатформенных программных средств и мобильных сервисов окружающего киберфизического пространства. Число научных публикаций — 92. saveliev@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-04-21.

**Поддержка исследований.** РФФ № 20-79-10325.

A. ERASHOV, K. KAMYNNIN, K. KRESTOVNIKOV, A. SAVELIEV  
**METHOD FOR ESTIMATING TIME OF WIRELESS TRANSFER  
OF ENERGY RESOURCES BETWEEN TWO ROBOTS**

*Erashov A., Kamynin K., Krestovnikov K., Saveliev A. Method for Estimating Time of Wireless Transfer of Energy Resources Between Two Robots.*

**Abstract.** The energy capacity of the batteries used as the main power source in mobile robotic devices determines the autonomous operation of the robot. To plan the execution of tasks by a group of robotic tools in terms of time consumption, it is important to take into account the time during which the battery of each individual robot is charged. When using wireless power transfer, this time depends on the efficiency of the power transfer system, on the power of the transferring part of the system, as well as on the level of charge required to recharge. In this paper, we propose a method for estimating the time of transfer of energy resources between two robots, taking into account these parameters. The proposed method takes into account the application of the algorithm for the final positioning of robots, the assessment of linear offsets between robots, includes the calculation of efficiency, as well as the determination of the battery charge time, taking into account the parameters obtained at the previous stages of the method. The final positioning algorithm for robots uses algorithms for processing data from a robot vision system to search for fiducial markers and determine their spatial characteristics to ensure the final positioning of mobile robotic platforms. These characteristics are also used to determine the linear offsets between robots, on which the efficiency of energy transfer depends. To determine it, the method uses a mathematical model of the energy characteristics of the wireless power transfer system and the obtained linear offsets. At the last stage of the method, the time for charging the battery of the mobile robot is calculated, taking into account the data from the previous stages. Application of the proposed method to simulate the positioning of robots in a certain set of points in the working space will reduce the time spent on charging the robot battery when using wireless power transfer. As a result of the simulation, it was determined that the transfer of energy resources between robots took place with an efficiency in the range from 58.11% to 68.22%, and out of 14 positioning points, 3 were identified with the shortest energy transfer time.

**Keywords:** mobile robotics, wireless power transfer, energy transfer time estimation, positioning of mobile robots, computer vision, ArUco marker.

**Erashov Aleksei** — Junior researcher, Laboratory of big data technologies in socio-cyberphysical systems, SPC RAS. Research interests: development of algorithms for controlling robots using computer vision and machine learning. The number of publications — 9. erashov.a@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

**Kamynin Konstantin** — Software engineer, Laboratory of autonomous robotic systems, SPC RAS. Research interests: data analysis and pattern recognition, machine learning in intelligent systems. The number of publications — 0. konstvictorovich@mail.ru; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

**Krestovnikov Konstantin** — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, SPC RAS. Research interests: development of a model and algorithms for the distribution of energy resources in a swarm of robotic means by bi-directional wireless power transfer. The number of publications — 25. k.krestovnikov@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

**Saveliev Anton** — Ph.D., Senior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, SPC RAS. Research interests: development of cross-platform software and mobile services of the surrounding cyber-physical space. The number of publications — 92. saveliev@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-04-21.

**Acknowledgements.** RSF № 20-79-10325.

## References

1. Rim C.T., Mi C. Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices. John Wiley & Sons. 2017. 632 p.
2. Riehl P.S., et al. Wireless power systems for mobile devices supporting inductive and resonant operating modes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. vol. 63. no. 3. pp. 780–790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.
3. Cortes I., Kim W. Autonomous Positioning of a Mobile Robot for Wireless Charging Using Computer Vision and Misalignment-Sensing Coils. 2018 Annual American Control Conference (ACC). 2018. pp. 4324–4329. <https://doi.org/10.23919/ACC.2018.8431723>.
4. Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils. Electromechanics and Robotics. 2022. pp. 359–369. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6\\_31](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31).
5. Won P., Biglarbegian M., Melek W. Development of an effective docking system for modular mobile self-reconfigurable robots using extended kalman filter and particle filter. Robotics. 2015. vol. 4. no.1. pp. 25-49. <https://doi.org/10.3390/robotics4010025>.
6. Song G., Wang H., Zhang J., Meng T. Automatic docking system for recharging home surveillance robots. IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2011. vol. 57. no. 2. pp. 428–435. <https://doi.org/10.1109/TCE.2011.5955176>.
7. Su K.L., Liao Y.L., Lin S.P., Lin S.F. An interactive auto-recharging system for mobile robots. International Journal of Automation and Smart Technology. 2014. vol. 4. no. 1. pp. 43-53. <http://dx.doi.org/10.5875/ausmt.v4i1.197>.
8. Vongbunyong S., Thamrongaphichartkul K., Worrasittichai N., Takutrua A. Automatic precision docking for autonomous mobile robot in hospital logistics-case-study: battery charging. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2021. vol. 1137. no. 1. pp. 012060. doi:10.1088/1757-899X/1137/1/012060.
9. Zhang X., Li X., Zhang X. Automatic Docking and Charging of Mobile Robot Based on Laser Measurement. 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2021. vol. 5. pp. 2229-2234. <https://doi.org/10.1109/IAEAC50856.2021.9390995>.
10. Guangrui F., Geng W. Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment. 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). 2017. pp. 79–83. <https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291357>.
11. Wang Y., Shan M., Yue Y., Wang D. Autonomous target docking of nonholonomic mobile robots using relative pose measurements. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. vol. 68. no. 8. pp. 7233–7243. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3001805>.
12. Barbosa J., Cardeira C., Oliveira P., Batista P., Silvestre C. Design and validation of an RGB-D based localization system-integration in a docking system. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2015. vol. 80. no. 3. pp. 423–440. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0181-7>.

13. Uyar Y.E.A.M.N., et al. Developing and modelling of satellite docking algorithm. 2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2017. pp. 465–471. <https://doi.org/10.1109/RAST.2017.8002987>.
14. Ivanov D.S., Koptev M.D., Tkachev S.S., Shachkov M.O. Docking algorithm for flexible microsatellite mock-ups on planar air-bearing testbench. Keldysh Institute Preprints. 2017. No. 110. 24 p. <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-110-e>.
15. Barrios L., Collins T., Kovac R., Shen W.M. Autonomous 6D-docking and manipulation with non-stationary-base using self-reconfigurable modular robots. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. pp. 2913–2919. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759451>.
16. Yan Z., et al. Autonomous underwater vehicle vision guided docking experiments based on L-shaped light array. IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 72567–72576. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917791>.
17. Babić A., Mandić F., Vasiljević G., Mišković N. Autonomous docking and energy sharing between two types of robotic agents. IFAC-PapersOnLine. 2018. vol. 51. no. 29. pp. 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.453>.
18. Guo S., et al. Binocular Camera-based a Docking System for an Amphibious Spherical Robot. 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2018. pp. 1621–1626. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2018.8484518>.
19. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P., Batista J. High-speed tracking with kernelized correlation filters. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2014. vol. 37. no. 3. pp. 583–596. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2345390>.
20. Dombia M., Cheng X., Havyarimana V. An auto-recharging system design and implementation based on infrared signal for autonomous robots. 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). 2019. pp. 894–900. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2019.8813317>.
21. Zhang J., Cai L., Chu Y., Zhou Q. A Sectional Auto-docking Charging Control Method for the Mobile Robot. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2019. pp. 330–335. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816514>.
22. Luo R.C., Huang C.H., Huang C.Y. Search and track power charge docking station based on sound source for autonomous mobile robot applications. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010. pp. 1347–1352. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5649993>.
23. Quilez R., Zeeman A., Mitton N., Vandaele J. Docking autonomous robots in passive docks with Infrared sensors and QR codes. International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TridentCOM). 2015. 10 p.
24. Kalaitzakis M., Carroll S., Ambrosi A., Whitehead C., Vitzilaios N. Experimental comparison of fiducial markers for pose estimation. 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2020. pp. 781–789. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213977>.
25. Krestovnikov K.D., Cherskikh E.O., Shabanova A.R. [Schematic and design solutions based on a synchronous rectifier for a wireless power transmission system]. Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii – Modeling, optimization and information technology. 2019. vol. 7. no. 4. 15 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.018>.
26. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics. Radioengineering. 2021. vol. 30, no. 1. pp. 142–149. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>.

27. Sajt s ishodnymi fajlami biblioteki OpenCV dlja jazyka programirovanija Python [Site with the source files of the OpenCV library for the Python programming language]. Available at: [github.com/opencv/opencv-python](https://github.com/opencv/opencv-python) (accessed 22.09.2021).
28. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots. International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2020. pp. 319–330. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3>.
29. Zakharov K.S., Saveliev A.I. [Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space]. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of the Southwest State University. 2021. vol. 24. no. 4. pp. 107–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.
30. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. Pearson Education India. 2009. 408 p.
31. Pioneer 3-AT mobile platform specification. Available at: [www.generationrobots.com/media/Pioneer3AT-P3AT-RevA-datasheet.pdf](http://www.generationrobots.com/media/Pioneer3AT-P3AT-RevA-datasheet.pdf) (accessed 22.09.2021).

А.Н. БАЛАБАНОВ, А.Е. БЕЗУГЛАЯ, Е.А. ШУШЛЯПИН  
**УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ ПОДВОДНОГО РОБОТА**

*Балабанов А.Н., Безуглая А.Е., Шушляпин Е.А. Управление манипулятором подводного робота.*

**Аннотация.** Рассматривается задача приведения конечного эффектора (центра схвата) антропоморфного манипулятора подводного аппарата в заданное положение за заданное время с помощью метода конечного состояния. На основе полученной кинематической модели антропоморфного манипулятора, построенной на основе подхода Денавита – Хартенберга (ДН-модель), сформулирована динамическая модель, учитывающая динамику приводов сочленений. ДН-модель использована в терминальном нелинейном критерии, отображающем близость ориентации и положения эффектора к заданным значениям. Динамическая модель приспособлена для эффективного применения авторского метода конечного состояния (МКС) и представляет собой систему дифференциальных уравнений для углов поворота звеньев манипулятора вокруг продольных и поперечных осей, правые части которой содержат только искомые МКС-управления. Такая модель позволила существенно упростить расчет управлений за счет упразднения численного решения дифференциальных уравнений специального вида, необходимых в случае использования в МКС нелинейных динамических моделей общего вида. Найденные МКС-управления далее использованы в выражениях для управляющих воздействий на электроприводы сочленений, полученных на основе динамических моделей электроприводов. Предполагается, что неизвестные параметры приводов, как функции углов поворота звеньев и других неизвестных факторов, могут быть определены экспериментально. Такая двухэтапная процедура позволила получить управление приводами в форме алгебраических и трансцендентных выражений. Наконец, представлены результаты моделирования процессов приведения конечного эффектора манипулятора в заданные положения на границах рабочей области с помощью разработанного программного обеспечения. Полученная при этом погрешность без учета погрешности измерений составила величины, не превышающие двух сантиметров на максимальном вылете руки длиной 1,2 метра. Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы по разработке роботизированного аппарата, предназначенного для подводных исследовательских работ на малых глубинах (до 10 метров).

**Ключевые слова:** подводный исследовательский аппарат, антропоморфный манипулятор, нелинейная система, метод конечного состояния, терминальное управление, кинематическая модель Денавита-Хартенберга, динамическая модель манипулятора.

**1. Введение.** В настоящее время имеет место применение антропоморфных манипуляторных роботов. В сочетании с технологиями искусственного интеллекта эти роботы позволяют выполнять манипуляторные операции, заменяющие человека в условиях неблагоприятной окружающей среды. Подводные манипуляторы представляют часть обширного семейства промышленных роботов. Они устанавливаются на обитаемых и необитаемых подводных аппаратах, самоподъемных платформах, устьевом оборудовании морских скважин. Благо-

даря сочетанию функций манипулятора и подводного аппарата появилось понятие подводного аппарата-робота (ПАР). При этом большинство ПАР имеют как минимум один манипулятор. Проблема автоматизации различных подводно-технических работ, труднодоступность и существующие при этом опасности для человека дали толчок к решению задачи автоматической ориентации (манипулирования) рабочего органа, изделия или инструмента. Большинство операций, выполняемых ПАР под водой, осуществляется с помощью систем управления с удаленным доступом (85% по данным MarketsandMarkets [1]). Вместе с тем сложное подводное окружение и характер решаемых задач требуют совершенствования системы управления ПАР в плане повышения степени ее интеллектуальности. В связи с этим ведутся интенсивные исследования и разработки, направленные на повышение степени автономности ПАР [2-4]. Используемые при этом методы основываются на современных технологиях, предложенных в работах по техническому зрению, навигации и управлению.

Одно из таких исследований выполняется авторами настоящей статьи в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», мероприятие 1.3 «Разработка и исследование робототехнического комплекса для выполнения подводно-технических работ в условиях ограниченной видимости с использованием комплексной системы 3D зрения высокого разрешения». Разрабатываемый роботизированный аппарат предназначен для подводных исследовательских работ на малых глубинах (до 10 метров) и должен обеспечивать достигаемую точность по положению до 5 сантиметров.

Частной задачей, решаемой в статье, является разработка метода управления приводами манипулятора, обеспечивающего заданную точность и учитывающем динамику приводов.

Предварительные исследования [5, 6] проводились с использованием реального робота SAR-400, являющегося одним из этапных проектов в разработке отечественного антропоморфного робота FEDOR [7]. В отчете [5] подробно рассматриваются существующие подходы к построению манипуляторов различного типа, в том числе подводных. В [8 -11] рассмотрены различные конструкции ПАР, в работах [6, 12-25] – методы управления. Для решения задачи управления движением конечного эффектора манипулятора традиционно используются методы математического программирования. Например, в [6] для управления роботом SAR-400 использован метод Бройдена – Флетчера –Голдфарба – Шенно, реализованный в модуле расширений

Robotics System Toolbox пакета Matlab. Используются также методы на основе нечетких систем управления [12, 17, 24], муравьиный алгоритм [21, 24], предиктивные регуляторы [18], генетические алгоритмы [19, 20, 22, 23], нейронные сети [25], другие методы решения обратной задачи кинематики [13-16]. В работе [26] приведены результаты компьютерного моделирования робота SAR-400, управляемого посредством разработанного алгоритма терминального управления методом конечного состояния (МКС-управления). В настоящей работе этот же метод применен к модели антропоморфного манипулятора (АМ) проектируемого подводного аппарата.

**2. Построение кинематической и динамической моделей антропоморфного манипулятора.** Возможный внешний вид антропоморфного манипулятора (АМ) и кинематическая схема показаны на рисунках 1а, 1б.

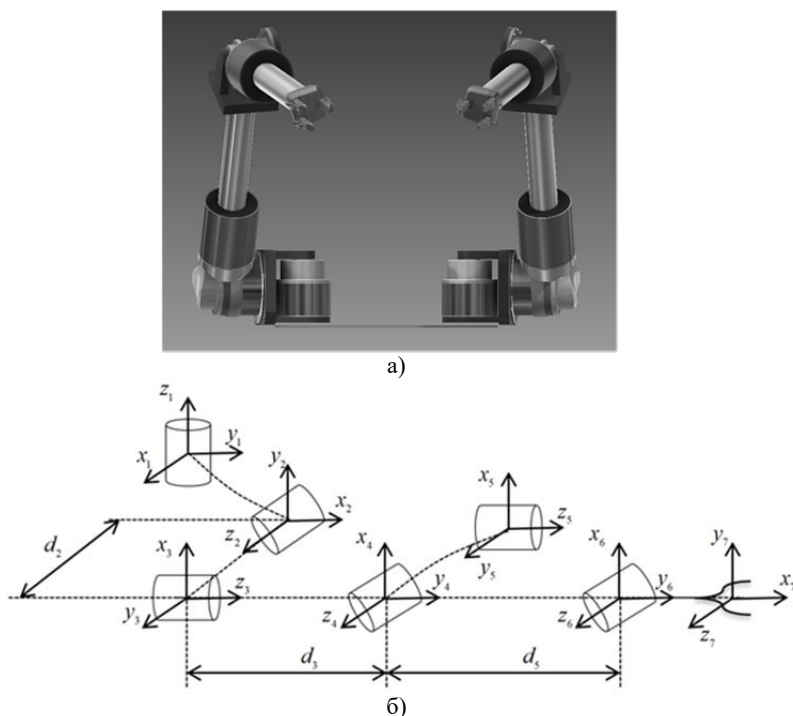


Рис. 1. Рука антропоморфного манипулятора: а) внешний вид; б) кинематическая схема



На рисунке 1б обозначены семь кинематических пар (КП) с соответствующими системами координат. При этом  $i$ -я КП вращается вокруг оси  $z_i$ ,  $i = 1, \dots, 7$ . Из схемы рисунка 1б видно, что пары с номерами 2, 4, 6 осуществляют повороты соответствующих звеньев вокруг осей, перпендикулярных продольным осям звеньев. Пары же с номерами 1, 3, 5 осуществляют ротацию звеньев вокруг своих осей. Система координат  $(x_7, y_7, z_7)$  соответствует схвату АМ, который в данной работе не рассматривается. Длины звеньев предполагаются равными  $d_2 = 100\text{мм}$ ,  $d_3 = 700\text{мм}$ ,  $d_5 = 500\text{мм}$ .

Ниже приведена кинематическая модель АМ, совпадающая с точностью до значений параметров с моделью АМ робота SAR-400 [26] и построенная методом Денавита – Хартерберга [27], где используются угловые и линейные параметры  $\theta_i, d_i, r_i, \alpha_i, i = 1, \dots, 6$ :

В таблице 1 приведены параметры Денавита – Хартерберга звеньев.

Таблица 1. Параметры Денавита – Хартерберга для руки без схвата

Звено, $i$	$r_i$ (м)	$\alpha_i$ (град)	$d_i$ (м)	$\theta_i$ (град)
1	0	90	0	90
2	0	90	0,1	90
3	0	-90	0,7	0
4	0	90	0	0
5	0	-90	0,5	0
6	0,2	0	0	-90

Согласно подходу Денавита – Хартерберга, для каждого  $i$ -го звена используется матрица преобразования:

$$A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & r_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & r_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{xi} & o_{xi} & a_{xi} & p_{xi} \\ n_{yi} & o_{yi} & a_{yi} & p_{yi} \\ n_{zi} & o_{zi} & a_{zi} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

а матрица преобразований от базовой системы координат до системы координат конечного эффектора равна:

$$A(\theta) = \prod_{i=1}^6 A_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} \bar{n}_n & \bar{o}_n & \bar{a}_n & \bar{p}_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где матрица  $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$  – матрица текущего состояния;  $C, S$  являются сокращенными обозначениями косинуса и синуса. Для конечного эффектора трехкомпонентные векторы  $\bar{\mathbf{n}}_n, \bar{\mathbf{o}}_n, \bar{\mathbf{a}}_n$  – единичные векторы системы координат конечного эффектора;  $\bar{\mathbf{p}}_n$  – вектор положения начала системы координат конечного эффектора относительно исходной (базовой) системы координат.

Решается задача приведения конечного эффектора АМ (в данном случае конца звена (6, 7) длиной 0,2 м) в заданное положение за заданное время с помощью метода конечного состояния [28]. С помощью предлагаемого метода можно подвести эффектор в заданное положение, а затем уже решать задачу захвата предмета (например, археологического артефакта). При этом в разрабатываемом ПАР предполагается использование в качестве измерителей стереовидеокамеры с функциями распознавания, а также датчиков состояния манипулятора и расстояния до выбранного предмета. Предполагаемые максимальное и минимальное расстояния, достигаемые манипулятором, 1,2 м и 0,25 м соответственно, максимальная масса груза – 6 кг.

Задавая матрицу

$$\mathbf{T}(\bar{\mathbf{n}}_n^*, \bar{\mathbf{o}}_n^*, \bar{\mathbf{a}}_n^*, \bar{\mathbf{p}}_n^*) = \begin{pmatrix} n_{xn}^* & o_{xn}^* & a_{xn}^* & p_{xn}^* \\ n_{yn}^* & o_{yn}^* & a_{yn}^* & p_{yn}^* \\ n_{zn}^* & o_{zn}^* & a_{zn}^* & p_{zn}^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{n}}_n^* & \bar{\mathbf{o}}_n^* & \bar{\mathbf{a}}_n^* & \bar{\mathbf{p}}_n^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

определяющую положение конечного эффектора, оптимизационную задачу можно сформулировать как:

$$\|\Delta(\boldsymbol{\theta}(t_f))\| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta(\boldsymbol{\theta}(t)) &= \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}(t)) - \mathbf{T}(\bar{\mathbf{n}}_n^*, \bar{\mathbf{o}}_n^*, \bar{\mathbf{a}}_n^*, \bar{\mathbf{p}}_n^*) = \\ &= \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{n}}_n - \bar{\mathbf{n}}_n^* & \bar{\mathbf{o}}_n - \bar{\mathbf{o}}_n^* & \bar{\mathbf{a}}_n - \bar{\mathbf{a}}_n^* & \bar{\mathbf{p}}_n - \bar{\mathbf{p}}_n^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{\bar{\mathbf{n}}} & \Delta_{\bar{\mathbf{o}}} & \Delta_{\bar{\mathbf{a}}} & \Delta_{\bar{\mathbf{p}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, вектор оптимизируемых параметров имеет структуру  $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_i\}, i = 1, \dots, 6$ . А задачу управления можно сформули-

ровать как задачу приведения руки манипулятора из состояния  $\theta(0)$  в заданное состояние  $\theta(t_f)$ .

Традиционный подход к расчету управлений, ориентированный на кинематические модели, имеет некоторые недостатки: неприменимость к динамическим моделям, учитывающим инерционность приводов сочленений; при программном управлении не используются обратные связи о текущих значениях углов  $\theta_i$ ; необходимость наличия программного обеспечения для надежного решения задач математического программирования.

По этим причинам предлагается определять углы  $\theta_i$  как функции времени и состояния на основе динамической модели антропоморфного робота, используя авторский метод конечного состояния [28].

Для применения метода конечного состояния, прежде всего, сформулируем терминальный критерий, отображающий подход фактора к некоторому заданному моменту времени  $t_f$  в заданное положение.

Вместо матрицы ошибок  $\Delta$  введем вектор-столбец ошибок:

$$\delta = [\Delta_{11}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{14}, \Delta_{21}, \Delta_{22}, \Delta_{23}, \Delta_{24}, \Delta_{31}, \Delta_{32}, \Delta_{33}, \Delta_{34}, \Delta_{41}, \Delta_{42}, \Delta_{43}, \Delta_{44}]^T, \quad (4)$$

а цель управления выберем в виде терминального критерия:

$$J(\theta(t_f)) = \delta(\theta(t_f))^T F \delta(\theta(t_f)) = \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\theta(t_f)) \rightarrow J^*, \quad (5)$$

где  $F$  – матрица весовых коэффициентов критерия;  $J^*$  – желаемое значение показателя. При точном приведении робота к  $T(\bar{p}_n^*, \bar{o}_n^*, \bar{a}_n^*, \bar{p}_n^*)$  значение  $J^*$  равно нулю.

Для решения задачи управления предлагаемым методом первоначально сформируем динамическую модель робота в виде, удобном для применения МКС, с управлениями  $u_i \equiv \omega_i$ :

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_i(t)}{dt} &= u_i, \quad i = 1, \dots, 6, \\ t \in [t_0, t_f], \quad \theta_i(t_0) &= \theta_i^0. \end{aligned} \quad (6)$$

Начальные условия  $\theta_i^0$  соответствуют начальному положению робота.

Критерий (5), по виду квадратичный, на самом деле нелинейный более сложного вида, ввиду трансцендентных зависимостей  $A_i(\theta)$  (1). По этой причине для решения задачи (5, 6) нельзя использовать методы оптимального управления для линейных систем.

Данная модель пока не учитывает динамику приводов сочленений, и ниже будет дополнена соответствующими уравнениями. Это связано с особенностями метода конечного состояния, который используется для решения поставленной задачи.

В критерии (5), согласно выражениям (3-4), необходимо также задать матрицу  $T(\vec{p}_n^*, \vec{o}_n^*, \vec{a}_n^*, \vec{r}_n^*)$ , которая определяется через заданные конечные ориентацию и положения руки АМ.

**3. Учет динамики приводов сочленений.** Получим управление при учете динамики приводов сочленений, когда вместо (6) в модели используются уравнения динамики приводов в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_i}{dt} &= \omega_i \\ \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{1}{J_i(\theta)} (M_{di} - M_{ci}(\theta)). \end{aligned} \quad (7)$$

В уравнениях (7),  $\omega_i$  – угловая скорость ротора привода  $i$ -й кинематической пары;  $J_i$  – приведенный момент инерции для  $i$ -й пары;  $M_{di}$  и  $M_{ci}$  – моменты движущих сил и сопротивления  $i$ -й пары соответственно. В случае приводов, реализованных на электродвигателях постоянного тока с постоянным возбуждением, без учета быстрых процессов в его обмотках, можно принять для малых угловых скоростей:

$$\begin{aligned} M_{di} &= k_{di} U_{Ai}, \\ M_{ci}(\theta) &= k_{ci} \omega_i + M_{gi}(\theta). \end{aligned}$$

Здесь использована упрощенная модель привода, учитывающая только механическую инерцию, ввиду чего момент движущих сил зависит от якорного напряжения, а не тока.

В последних выражениях  $k_{di}, k_{ci}$  – конструктивные параметры. Составляющие момента сопротивления – от вязкого трения  $k_{ci}\omega_i$  и от веса  $M_{gi}(\theta)$  тех частей АМ, которые вращает данный электропривод. Например, электропривод КП в основании АМ вращает все его три звена, а электропривод звена схвата – только одно звено. При этом этот момент сопротивления зависит от углов  $\theta = \{\theta_i\}, i = 1, \dots, 6$ . Если эти углы таковы, что вращение всей конструкции происходит в горизонтальной плоскости, то соответствующий момент  $M_{gi}(\theta)$  равен нулю. Если же вращение конструкции происходит в вертикальной плоскости, то соответствующий момент будет равен произведению массы конструкции на плечо, равное расстоянию от вала двигателя до центра тяжести конструкции. От углов  $\theta_i$  зависят и моменты инерции  $J_i(\theta)$ . Указанные зависимости от  $\theta$  можно рассчитать аналитически как функции компонент вектора  $\theta$  и подставить в выражения для якорных напряжений электропривода, которые получены ниже. Однако, на наш взгляд, целесообразно получить указанные зависимости экспериментально, например, в виде соответствующих регрессионных моделей или нейронных сетей, где помимо  $\theta_i$  можно учесть и другие значимые факторы, например, температуру и плотность воды. Это особенно имеет смысл для рассматриваемого подводного робота, поскольку при движении достаточно «толстых» рук манипулятора (рисунок 1а) в воде моменты инерции и сопротивления зависят от присоединенных масс воды.

В данном случае управляющими воздействиями являются якорные напряжения  $U_{Ai}$ . Имея в виду, что угловые скорости  $\omega_i$  являются одновременно компонентами МКС-управления  $u_i$ , выразим искомые управления  $U_{Ai}$  через  $\omega_i \equiv u_i$ . Получаем:

$$U_{Ai} = \frac{1}{k_{di}} \left( J_i(\theta) \frac{du_i}{dt} + k_{ci}u_i + M_{gi}(\theta) \right). \quad (8)$$

Для определения (8) необходимы измерения элементов вектора  $\theta$  и угловых ускорений приводов  $\frac{du_i}{dt}$ . Однако, ввиду того, что МКС-управления имеют алгебраический вид, производная МКС-

управления  $\frac{du_i}{dt}$  может быть получена в виде аналитического выражения, что показано ниже.

**4. Основные расчетные соотношения метода конечного состояния.** Метод конечного состояния [28], относящийся к классу методов для решения обратной задачи динамики, разработан для решения задач терминального управления нелинейными аффинными системами с гладкими функциями в критерии и динамическими ограничениями разного рода (дифференциальными, дифференциальными с запаздываниями, конечно-разностными и др.). Для рассматриваемых условий постановка задачи управления имеет вид:

$$\begin{aligned} J &= J(\mathbf{z}(t_f)) \rightarrow J^*, \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \mathbf{\Phi}(t, z(t)) + \mathbf{B}(t, z(t)) \cdot \mathbf{u}(t), \\ t \in [t_0, t_f], \mathbf{z}(t_0) &= \mathbf{z}^0, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\mathbf{z}$  – вектор состояния;  $J(\mathbf{z}(t_f))$  – непрерывная и дифференцируемая целевая функция терминального критерия с заданным значением  $J^*$ ;  $\mathbf{\Phi}$  и  $\mathbf{B}$  – в общем случае нелинейные функции времени  $t$  и текущего состояния  $\mathbf{z}(t)$ ;  $\mathbf{z}^0$  – заданное начальное состояние. При этом  $\mathbf{\Phi}$  – дифференцируемая функция.

В рассматриваемом методе управление рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t, \mathbf{z}(t)) &= \mathbf{G}^+ \cdot f_J, \\ \mathbf{G}^+ &= \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1}, \\ \mathbf{G} &= \left. \frac{\partial J(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \right|_{\mathbf{z}=\hat{\mathbf{z}}(t_f, t, \mathbf{z}(t))} \cdot \mathbf{W}(t_f, t, \mathbf{z}(t)) \mathbf{B}(t, \mathbf{z}(t)), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $f_J = (J^* - J(\hat{\mathbf{z}}(t_f, t, \mathbf{z}(t)))) / T_u$  – правая часть дифференциального уравнения  $\frac{dJ}{dt} = \frac{J^* - J}{T_u}$ , которое задает желаемое экспоненциальное с постоянной времени  $T_u$  приближение критериальной функции (КФ)

$J(\hat{\mathbf{z}}(t_f, t, \mathbf{z}(t)))$  времени  $t$  к значению  $J^*$ , что имеет место при достаточно малом  $T_u \ll t_f$ . Можно задавать и другие формы КФ. Например, при переменном во времени  $T_u = t_f - t$  форма линии, по которой КФ «приближается» к  $J^*$ , уже не экспонента, а прямая. Для экспоненциальной формы характерно, что при ее использовании управление формируется таким образом, что достижение заданного значения  $J^*$  происходит с регулируемой параметром  $T_u$  скоростью. Следует отметить, что реализация желаемой формы КФ не всегда возможна, что происходит, в частности, при недостижимой заданной цели управления. Отклонение теоретической и фактической форм КФ происходит также, когда на управление вида (11) накладываются амплитудные ограничения. В этом случае цель управления может быть достигнута, однако форма фактической КФ будет отклоняться от заданной.

В выражениях (10) используются переменные конечного состояния (ПКС)  $\hat{\mathbf{z}}$  и нелинейная переходная матрица (ПМ) В.М. Алексеева [29]  $\mathbf{W}$ , определяемая совместной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\mathbf{z}}(\mathcal{G}, t, \mathbf{z}(t))}{d\mathcal{G}} &= \mathbf{\Phi}(\mathcal{G}, \hat{\mathbf{z}}), \\ \frac{d\mathbf{W}(\mathcal{G}, t, \mathbf{z}(t))}{d\mathcal{G}} &= \left. \frac{\partial \mathbf{\Phi}(\mathcal{G}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \right|_{\mathbf{z}=\hat{\mathbf{z}}(\mathcal{G}, t, \mathbf{z}(t))} \cdot \mathbf{W}, \\ \mathcal{G} \in [t, t_f], \hat{\mathbf{z}}(t, \mathbf{z}(t)) &= \mathbf{z}(t), \mathbf{W}(t, \mathbf{z}(t)) = \mathbf{I}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Заметим, что ПКС и ПМ в (10) нужны как функции второго аргумента  $t$ , а по (11) они определяются как функции первого аргумента  $\mathcal{G}$  для каждого из значений  $t$ . По этой причине в общем случае для расчета МКС-управления в каждый момент времени  $t$  необходимо интегрировать систему (11) на скользящем интервале  $\mathcal{G} \in [t, t_f]$ .

### 5. Применение МКС для управления манипулятором.

Напомним, что согласно постановке задачи (5, 6), вектор состояния  $\mathbf{z} \equiv \boldsymbol{\theta}$ , матрица  $\mathbf{\Phi} = 0$ , а матрица  $\mathbf{B}$  – единичная. Для случая  $\mathbf{\Phi} = 0$ , который имел место и в других решенных авторами задачах [26, 30, 31], можно провести ряд упрощений вычислительных процедур метода

конечного состояния. В итоге имеем следующие выражения для составляющих управления:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{z}}(\vartheta, t, \mathbf{z}(t)) &= \mathbf{z}(t) \equiv \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{W}(\vartheta, t, \mathbf{z}(t)) = \mathbf{I} \quad \forall t \in [t, t_f] \\
 J(\mathbf{z}(t)) &= J(\boldsymbol{\theta}(t)) = \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t)), \\
 \mathbf{G} &= \left. \frac{\partial \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}(t)} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{I} \equiv \left. \frac{\partial \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right|_{\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{\theta}(t)} = \quad (12) \\
 &= 2 \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \frac{\partial \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}}.
 \end{aligned}$$

При получении выражения для матрицы  $\mathbf{G}$  размерности  $(6 \times 1)$  (число 6 – от числа кинематических пар) учтено, что матрицы  $\mathbf{W}$  и  $\mathbf{V}$  – единичные (обозначены  $\mathbf{I}$ ), вектор переменных конечного состояния  $\hat{\mathbf{z}}$  равен текущим значениям вектора состояния, в данном случае  $\boldsymbol{\theta}(t)$ , из-за  $\Phi = 0$  (см. (11)).

Таким образом:

$$G_i = 2 \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \frac{\partial \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \theta_i}, i = 1, \dots, 6. \quad (13)$$

Определим составляющие выражения (13). Для определения  $\frac{\partial \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \theta_i}$  воспользуемся (4), определив соотношение между индексом  $j$  вектора  $\boldsymbol{\delta}$  и индексами ошибки  $\Delta_{ks}$ , которое имеет вид:

$$j = k + 3(s-1).$$



Смысл последнего выражения в том, что, к примеру,  $\Delta_{23}$ , то есть  $\Delta_{ks}$  при  $k=2, s=3$  соответствует восьмому элементу вектора  $\delta$ .

Дифференцируя  $\Delta(t)$  по  $\theta_i$  имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta(t)}{\partial \theta_i} &= \frac{\partial}{\partial \theta_i} \left( \prod_{l=1}^6 \mathbf{A}_l(\theta_l(t)) \right) = \\ &= \mathbf{A}_1(\theta_1) \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1}(\theta_{i-1}) \times \frac{\partial \mathbf{A}_i(\theta_i)}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1}(\theta_{i+1}) \times \dots \times \mathbf{A}_6(\theta_6). \end{aligned}$$

В итоге имеем:  $\frac{\partial \delta_j}{\partial \theta_i} = \frac{\partial \Delta_{ji}}{\partial \theta_i}$ .

Получим производную по времени от управления (10), которое требуется для расчета якорного напряжения по выражению (8) для случая, когда в качестве приводов сочленений используются электроприводы постоянного тока с постоянным возбуждением. Учитывая  $\dim \theta = (6 \times 1)$ ,  $\dim \mathbf{G} = (1 \times 6)$ ,  $\dim f_J = (1 \times 1)$ , получаем:

$$\dim \mathbf{G}^+ = \dim \left( \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} \right) = (6 \times 1)(1 \times 6)(6 \times 1) = (6 \times 1),$$

$$\dim \left( \frac{\partial \mathbf{G}^+(\theta)}{\partial \theta} \right) = (6 \times 6), \dim \left( \frac{\partial f_J(\theta)}{\partial \theta} \right) = (1 \times 6), \dim \left( \frac{\partial \mathbf{G}^T}{\partial \theta} \right) = (6 \times 6).$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}(t)}{dt} &= \frac{\partial \mathbf{G}^+(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} f_J(t) + \mathbf{G}^+(\theta) \cdot \frac{\partial f_J(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} = \\ &= \left( -\frac{\partial \mathbf{G}^+}{\partial \theta} \cdot \frac{J^* - J}{T_u} - \mathbf{G}^+ \cdot \frac{1}{T_u} \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta} \right) \mathbf{u}. \end{aligned}$$

Окончательное выражение для якорного напряжения с моделью привода (7) получает вид:

$$\begin{aligned} U_{Ai} = \\ = \frac{1}{k_{di}} \left( \left( J_i(\theta) \left( \left( -\frac{\partial \mathbf{G}^+}{\partial \theta} \cdot \frac{J^* - J}{T_u} - \mathbf{G}^+ \cdot \frac{1}{T_u} \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta} \right) \right) + k_{ci} \right) u_i + M_{g_i}(\theta) \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Выражения для производных могут быть получены на основе (10), (13) и имеют вид:

$$\frac{\partial \mathbf{G}^+(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \begin{pmatrix} a_1 \frac{\partial G_1}{\partial \theta_1} & \dots & a_6 \frac{\partial G_1}{\partial \theta_6} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_1 \frac{\partial G_6}{\partial \theta_1} & \dots & a_6 \frac{\partial G_6}{\partial \theta_6} \end{pmatrix} + \frac{1}{G_1^2 + \dots + G_6^2} \begin{pmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial G_1}{\partial \theta_6} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial G_6}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial G_6}{\partial \theta_6} \end{pmatrix},$$

$$a_i = 2 \sum_{j=1}^6 G_j \frac{\partial G_j}{\partial \theta_i},$$

$$\frac{\partial G_i}{\partial \theta_j} = 2 \sum_{k=1}^{12} F_k \frac{\partial^2 \delta_k(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j \partial \theta_i} (1 + \delta_k(\boldsymbol{\theta})),$$

$$G_i = 2 \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \left( \mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ji},$$

$$\frac{\partial^2 \delta_k(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j \partial \theta_i} = \frac{\partial}{\partial \theta_j} \left( \mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{k-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{k+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ki} =$$

$$= \begin{cases} \left( \mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{j-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_j}{\partial \theta_j} \times \dots \times \mathbf{A}_{j+1} \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ki}, & i \neq j, \\ \left( \mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial^2 \mathbf{A}_i(\theta_i)}{(\partial \theta_i)^2} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ki}, & i = j, \end{cases}$$

$$i, j = 1, \dots, 6.$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^{12} 2F_j \left( \mathbf{A}_1 \times \dots \times \mathbf{A}_{i-1} \times \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial \theta_i} \times \mathbf{A}_{i+1} \times \dots \times \mathbf{A}_6 \right)_{ji}.$$

Таким образом, управляющее воздействия в форме алгебраических и трансцендентных выражений, где трансцендентность скрыта в зависимостях  $\mathbf{A}_i$  от тригонометрических функций (см. (1)). Напомним, что управления  $u_i$  являются МКС-управлениями (10 – 13). Если вычислительные возможности управляющего компьютера ограничены и не способны в реальном времени рассчитывать полученное управление с учетом конкретизированных аналитических выражений для производных, то остается возможность использования формулы (8), пред-

полагающей наличие измерителей угловых ускорений роторов приводов. Заметим, что при вычислении управлений  $u_i$  и  $U_{A_i}$  наиболее трудоемкими составляющими являются те, где рассчитываются произведения матриц  $A_i$  с вкраплениями на соответствующих местах  $\partial A_i / \partial \theta_i$  или  $\partial^2 A_i(\theta_i) / (\partial \theta_i)^2$ . При этом существует возможность рационализации вычислений за счет многократного использования частичных произведений матриц  $A_i$ :

$$A_1, A_1 A_2, \dots, A_1 A_2 A_3 A_4 A_5, A_6, A_5 A_6, \dots, A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 .$$

Указанные частичные произведения рассчитываются один раз на каждом временном шаге, сохраняются в памяти, и используются при вычислении приведенных выше выражений.

**6. Результаты моделирования.** Для тестирования предложенного подхода к построению управления АМ разработана программа и выполнено компьютерное моделирование управления АМ  $u_i$  модели (6) в виде МКС-управления (10-13).

В качестве целей управления выбраны следующие: 1) приведение эффектора в точки П1, П2, удаленные от основания АМ на максимальное/минимальное расстояния 1,2м/0,25м вперед; 2) приведение АМ в точки П3 (+), П4 (-) на границах сектора  $\pm 60^\circ$  и заданным максимальным радиусом 1,2 м; 3) приведение АМ в точки П5 (+), П6 (-) на границах сектора  $\pm 60^\circ$  и заданным минимальным радиусом 0,25м; 4) приведение АМ в точку П7 с произвольными (в допустимой области) параметрами ориентации и положения.

Результаты моделирования приведены ниже для следующих параметров модели: начальные условия  $\theta|_{t=0} = (0 \quad 90^\circ \quad 0 \quad 65^\circ \quad 0 \quad 0)$ ;  $T_u = 0,01c$ ; время моделирования  $t_f = 1c$ ;  $F = I$ ;  $J^* = 0$ .

Вначале приведем сравнительные значения определенных выше целевых матриц  $T(\bar{n}_n^*, \bar{o}_n^*, \bar{a}_n^*, \bar{p}_n^*)$  и матриц  $P = A(\theta(t_f)) = \prod_{i=1}^6 A_i(\theta_i(t_f))$ , показывающих достигнутые конечные ориентацию и положение.

Для точки П1 получено:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,038 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,0379 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П2 получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,9515 \\ 1 & 0 & 0 & -0,55 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0008 & 1 & 0 & 0,9445 \\ 1 & 0,0008 & 0 & -0,5425 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П3 с расстоянием  $R = 1,2$  м на границе сектора +60 градусов вначале вычислим расстояния по осям  $x, y$ . Получим при  $R = 1,2$ :

$$y = R \cdot \cos 60^\circ = \frac{R}{2} = 0,6;$$

$$x = \sqrt{R^2 - y^2} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \frac{R}{2}\sqrt{3} = 0,6 \cdot 1,73 = 1,038.$$

Тогда для точки П3 получаем:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,038 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1,0379 \\ 1 & 0 & 0 & 0,6 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П4 с расстоянием  $R = 1,2$  м получены относительно большие погрешности позиционирования (5 – 10 см). Поэтому расстояние  $R$  было уменьшено на 0,1 м, и для  $y = -\frac{1,1}{2} = -0,55$ ;  $x = 0,55 \cdot 1,73 = 0,9515$  получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,9515 \\ 1 & 0 & 0 & -0,55 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0008 & 1 & 0 & 0,9445 \\ 1 & 0,0008 & 0 & -0,5425 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П5 с расстоянием  $R = 0,25$  м на границе сектора +60 градусов при  $x = 0,125 \cdot 1,73 = 0,2163$ ,  $y = 0,125$  получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,2163 \\ 1 & 0 & 0 & 0,125 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0008 & 1 & -0,0006 & 0,2133 \\ 1 & 0,0008 & -0,0004 & 0,1272 \\ -0,0004 & -0,0006 & -1 & 0,0035 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П6 с расстоянием  $R = 0,25$  м на границе сектора  $-60$  градусов при  $x = 0,125 \cdot 1,73 = 0,2163$ ,  $y = -0,125$  получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,2163 \\ 1 & 0 & 0 & -0,125 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0,2162 \\ 1 & 0 & 0 & -0,125 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для точки П7 со случайными в допустимых диапазонах значениях элементов матрицы  $\mathbf{T}$  получено:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} -0,0933 & -0,9616 & 0,2581 & 0,7265 \\ 0,9728 & -0,1432 & -0,1819 & -0,0822 \\ 0,2119 & 0,2341 & 0,9488 & -0,6157 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} -0,0933 & -0,9616 & 0,2581 & 0,7266 \\ 0,9728 & -0,1432 & -0,1819 & -0,0822 \\ 0,2119 & 0,2341 & 0,9488 & -0,6159 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

При задании параметров ориентации в левой угловой подматрице размерности  $3 \times 3$ , то есть матрице поворота, следует иметь в виду, что указанные параметры не могут выбираться произвольно. Так, вектор-столбцы матрицы поворота должны по норме быть равны единицам, а углы между векторами должны быть прямыми, образующими правую систему координат. Таким образом, из девяти элементов матрицы поворота, независимыми являются только три. Следовательно, матричная система уравнений  $\mathbf{P} = \mathbf{T}$ , формально содержащая 16 уравнений (из них 4 тождества) с 6-ю неизвестными, на самом деле содержит всего 6 независимых уравнений ввиду наличия связей между элементами матрицы поворота – трех связей для норм и трех связей, определяющих ортогональности трех пар векторов. Это определяет единственность решения системы  $\mathbf{P} = \mathbf{T}$ , если якобиан этой системы

является неособой матрицей. В противном случае решение не единственно.

При формировании матрицы  $T$  для точки П7 использовалось ДН-преобразование  $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^6 \mathbf{A}_i(\theta_i) = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{n}}_n & \bar{\mathbf{o}}_n & \bar{\mathbf{a}}_n & \bar{\mathbf{p}}_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  при случайно выбранных значениях  $\theta_i$ . При применении МКС для решения обратной задачи получается одно из возможных решений, если их много.

На рисунках 2 и 3 показаны графики зависимостей от времени  $t$  КФ  $J(\boldsymbol{\theta}(t)) = \sum_{j=1}^{12} F_j \delta_j^2(\boldsymbol{\theta}(t))$  и углов  $\boldsymbol{\theta}(t)$  для точки ПЗ. При этом на графике рисунка 2 показаны слившиеся две кривые – теоретическая и фактическая КФ. Это свидетельствует о том, МКС-управление достигает поставленной цели – приведения КФ к заданному нулевому значению, что свидетельствует о практически нулевых невязках (5).

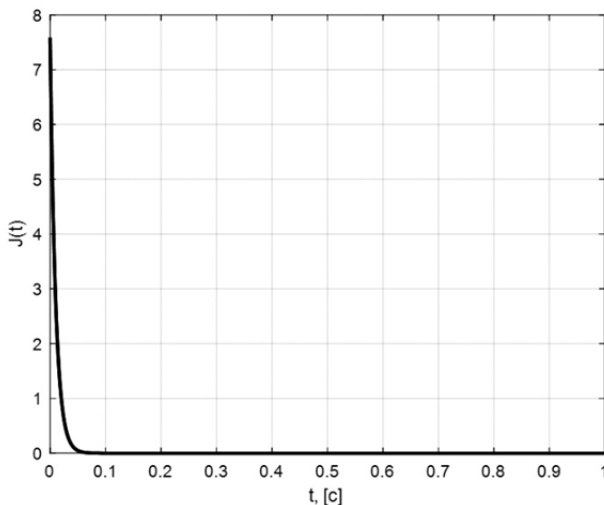


Рис. 2. Зависимость целевой функции от времени для точки ПЗ

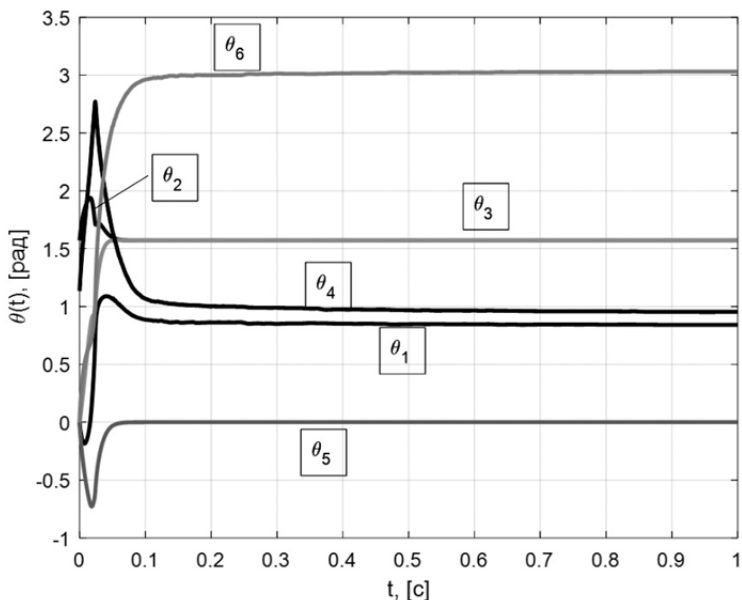


Рис. 3. Зависимости углов  $\theta_i(t), i = 1, \dots, 6$  для точки ПЗ

В таблице 2 приведены конечные значения углов  $\theta_i(t_f), i = 1, \dots, 6$  для точек П1 – П6 вместе с их предельными диапазонами.

Таблица 2. Предельные значения углов  $\theta_i(t_f), i = 1, \dots, 6$

	$\theta_1$ [ $-90^\circ, +90^\circ$ ]	$\theta_2$ [ $-90^\circ, +180^\circ$ ]	$\theta_3$ [ $-180^\circ, +180^\circ$ ]	$\theta_4$ [ $-30^\circ, +165^\circ$ ]	$\theta_5$ [ $-90^\circ, +90^\circ$ ]	$\theta_6$ [ $-100^\circ, +100^\circ$ ]
П1	-1,2620	90,0100	90,0808	8,4626	-0,0683	170,4721
П2	8,3467	90,0122	89,9683	164,450 4	-0,0466	23,9068
П3	4,2298	90,0104	90,0206	54,5863	-0,0128	173,6506
П4	-2,4224	90,0097	90,0412	19,2668	-0,0294	135,2707
П5	8,7142	90,2769	56,8330	179,438 5	- 33,1665	9,1524
П6	-5,0186	90,0121	89,9861	155,830 5	-0,0297	19,1577

В большинстве случаев предельные значения соблюдаются или нарушаются незначительно. Иногда нарушение существенно, например по углу  $\theta_6$ . Однако, из рисунка 1а видно, что соответствующая КП для вращения схвата не имеет принципиальных ограничителей на угол поворота звена вокруг продольной оси, поэтому указанные ограничения можно увеличить без значительных конструктивных переделок.

**7. Заключение.** Сравняя матрицы **P** с целевыми матрицами **T** для точек П1 – П7, видим, что погрешности достижения координат по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  достаточно малы и не превышают 2 см. Погрешности конечной ориентации эффектора также очень малы (погрешности компонент единичных векторов ориентации не превышают 0,0008). При этом наибольшая погрешность наблюдается на максимальном «вылете» руки АМ. В большинстве же случаев ошибки положения лежат в пределах миллиметров и долей миллиметра. Здесь не учтены погрешности измерителей углов поворота и ротации звеньев, которые в данном подходе должны использоваться, поскольку управление использует обратные связи. Заметим также, что МКС не накапливает ошибок предыстории, поэтому случайные центрированные ошибки измерений будут компенсироваться.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Метод конечного состояния оказался работоспособным для решения задачи управления положением и ориентацией конечного эффектора антропоморфного манипулятора.
2. Точность достижения заданных значений пространственных координат удовлетворяет заданным требованиям – до 5см.
3. Двухэтапный способ учета динамики системы, примененный с целью упрощения расчетов МКС-управления, может применяться и в случае использования других методов аналитического синтеза нелинейных систем, например, принципа максимума.
4. Предлагаемый подход позволяет вместо относительно дорогих сервоприводов, обрабатывающих заданные значения предварительно рассчитанных углов поворота сочленений, использовать обычные приводы разного типа (в статье в качестве примера взят электропривод постоянного тока); при этом использование обратных связей от фактических значений углов позволяет легче достичь требуемой точности, чем при использовании программного управления.

Дальнейшие исследования в данном направлении в части применения метода на практике – идентификация моделей приводов путем проведения натуральных подводных экспериментов с целью опреде-



ления присоединенных моментов сопротивления и инерции. Целесообразно также развивать примененный здесь двухэтапный подход для других задач управления.

### Литература

1. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // MarketsandMarkets. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-underwater-vehicles.asp>. (дата обращения: 20.01.2020).
2. Casalino G., Caccia M., Caiti A., Antonelli G., Indiveri G., Melchiorri C., Caselli S. MARIS: A National Project on Marine Robotics for InterventionS, in: Proc. 22nd Mediterranean Conf. on Control and Automation, MED'14, IEEE, 2014, pp. 864 - 869.
3. Lane D.M., Maurelli F., Larkworthy T., Caldwell D., Salvi J., Fox M., Kyriakopoulos K. PANDORA: Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning // IFACPapersOnLine. Vol. 48. Issue 2. 2015. pp. 238–243.
4. Sanz P.J., Ridao P., Oliver G., Casalino G., Petillot Y., Silvestre C., Melchiorri C., Turetta A. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions // 2013 OCEANS - San Diego, 23-27 Sept. 2013. pp. 1 – 10.
5. Разработка и исследование робототехнического комплекса для выполнения подводно-технических работ в условиях ограниченной видимости с использованием комплексной системы 3D-зрения высокого разрешения /А.А.Кабанов, В.А. Крамарь, Е.А. Шушляпин и др. // Отчет о НИР (г/б №АААА-А18-11812259008). Севастополь, СевГУ, 2018.
6. Kabanov A.A., Balabanov A.N. The modeling of an anthropomorphic robot arm // MATEC Web of Conferences 224, Vol. 224, 2018 (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018, 6 pages.
7. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research. URL: <https://dfnc.ru/kosmos/fedor-robot-poletel-v-kosmos/> (Дата обращения 24.02.2020).
8. Подводные манипуляторы. URL: [http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017\\_LFL\\_manip.pdf](http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017_LFL_manip.pdf) (Дата обращения 15.01.2020).
9. Автономный подводный робот-краб. URL: <https://ria.ru/science/20180419/1518950715.html> (Дата обращения 04.09.2019).
10. Облегченный подводный пятистепенной электроманипулятор. URL: <http://www.tetis-pro.ru/news/803/> (Дата обращения 24.01.2020).
11. Подводный робот политехников «Одиссей». URL: [https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy\\_robot\\_politehnikov\\_pozvolit\\_o&print=1](https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy_robot_politehnikov_pozvolit_o&print=1) (Дата обращения 05.09.2019).
12. Vu N.Thi-Thuy, Tran N. P., Nguyen N.H. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Path Planning for Excavator Arm // Hindawi Journal of Robotics, Volume 2018 |Article ID 2571243. 7 pages.
13. Han X., Yin M., Liu X., Yin G. Solution of inverse kinematics and movement trajectory simulation for 6R robot // Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). vol. 47, no. 6, 2015, pp. 185–190.
14. She M., Tian L. A Novel Path Control Algorithm for Networked Underwater Robot // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2018. Article ID 1520981. 7 pages.

15. Ananthanarayanan H., Ordóñez R. Real-time Inverse Kinematics of  $(2n + 1)$  DOF hyper-redundant manipulator arm via a combined numerical and analytical approach // Mechanism and Machine Theory. vol. 91. 2015. pp. 209–226.
16. Legowski A. The global inverse kinematics solution in the adept six 300 manipulator with singularities robustness // Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS 2015. Romania. 2015. pp. 90–97.
17. Mahmoodabadi M. J., Ziaei A. Inverse Dynamics Based Optimal Fuzzy Controller for a Robot Manipulator via Particle Swarm Optimization // Hindawi Journal of Robotics, Volume 2019. Article ID 5052185. 10 pages.
18. Mendili M., Bouani F. Predictive control of mobile robot using kinematic and dynamic models // Journal of Control Science and Engineering. vol. 2017. Article ID 5341381, 11 pages.
19. LIN Y. Solution of Inverse Kinematics for General Robot Manipulators Based on Multiple Population Genetic Algorithm // Journal of Mechanical Engineering, vol. 53. no. 3. 2017. p. 1.
20. Momani S., Abo-Hammour Z.S., Alsmadi O.M.K. Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms // Applied Mathematics & Information Sciences. vol. 10. no. 1. 2016. pp. 225–233.
21. Wang H-J, Fu Y., Zhao Z-Q, Yue Y-J. An Improved Ant Colony Algorithm of Robot Path Planning for Obstacle Avoidance // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2019. Article ID 6097591. 8 pages.
22. Kong H., Li N., Shen Y. Adaptive double chain quantum genetic algorithm for constrained optimization problems // Chinese Journal of Aeronautics. vol. 28. no. 1, 2015. pp. 214–228.
23. Lv X., Zhao M. Application of Improved BQGA in Robot Kinematics Inverse Solution // Hindawi Journal of Robotics. Volume 2019. Article ID 1659180. 7 pages.
24. Zhao M., Dai Y. Application of fuzzy ant colony algorithm to robotics arm inverse kinematics problem // ICIC Express Letters. vol. 10. no. 1. 2016. pp. 43–49.
25. Zhang Y.F., Ma Z.S. A simulated annealing neural network solution to inverse kinematics of EOD manipulator // Computer Measurement & Control. vol. 23. no. 4. 2015. pp. 1269–1272.
26. Шушляпин Е.А., Безуглая А.Е. Управление антропоморфным роботом методом конечного состояния // «Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения АППР-2019», г. Севастополь, 09–13 сентября 2019 г. Материалы IV Международной научно-технической конференции / «Автоматизация и измерения в машиноприборостроении». №3(7). 2019. С.38 – 47.
27. Denavit J., Hartenberg R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // Transactions ASME Journal of Applied paMechanics. 23, 1955. pp. 215–221.
28. Шушляпин Е.А. Управление нелинейными системами на основе прогноза конечного состояния неуправляемого движения // Севастополь: СевНТУ, 2012. 282 с.
29. Алексеев В.М. Об одной оценке возмущений обыкновенных дифференциальных уравнений // Вестн. Москов. ун-та. Сер.1. Математика, механика. 1961. №2. С.28 – 36.
30. Шушляпин Е.А. и др. Нелинейные регуляторы для удержания судна на заданной траектории при «сильных» маневрах // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 53. С. 178–200.
31. Shushlyapin E.A., Bezuglaya A.E. Analytical Synthesis of Regulators for Nonlinear Systems with a Terminal State Method on Examples of Motion Control of a Wheeled Robot and a Vessel // Hindawi Journal of Applied Mathematics, vol. 2018 Article ID 4868791, 2018, 13 pages.

**Балабанов Алексей Николаевич** — канд. техн. наук, доцент, кафедра информатики и управления в технических системах института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: оптимизация и синтез систем автоматического управления. Число научных публикаций — 20. alexey.balabanov83@gmail.com; пр. Октябрьской революции, 25, 299057, Севастополь, Россия; р.т.: +7 (978) 012-4469.

**Безуглая Анна Евгеньевна** — канд. техн. наук, доцент, кафедра информационных систем института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: робототехника. Число научных публикаций — 31. anna\_bezuglaya@list.ru; ул. Колобова, 19, 299038, Севастополь, Россия; р.т.: +7 (978) 709-33-78.

**Шушляпин Евгений Андреевич** — д-р техн. наук, профессор, кафедра информатики и управления в технических системах института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: управление нелинейными системами. Число научных публикаций — 141. bu6@bk.ru; ул. Молодых строителей, 16, 299006, Севастополь, Россия; р.т.: +7 (8692) 435-130.

**Поддержка исследований.** Данные исследования выполняются при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (соглашение № 14.578.21.0264, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57818X0264).

A. BALABANOV, A. BEZUGLAYA, E. SHUSHLYAPIN  
**UNDERWATER ROBOT MANIPULATOR CONTROL**

*Balabanov A., Bezuglaya A., Shushlyapin E. Underwater Robot Manipulator Control.*

**Abstract.** This paper deals with the problem of bringing the end effector (grip center) of an underwater vehicle anthropomorphic manipulator to a predetermined position in a given time using the terminal state method. A dynamic model with the account of joint drives dynamics is formulated on the basis of obtained kinematic model constructed by using the Denavit-Hartenberg method (DH model). The DH model is used in a terminal nonlinear criterion that displays estimate of the proximity of the effector's orientation and position to the specified values. The dynamic model is adapted for effective application of the author's terminal state method (TSM) so that it forms a system of differential equations for the rotation angles of manipulator links around the longitudinal and transverse axes, having only desired TSM-controls in the right parts. The converted model provides simplifications of controls calculation by eliminating the numerical solution of special differential equations, that is needed in the case of using in TSM nonlinear dynamic models in general form. The found TSM-controls are further used in expressions for control actions on joints electric drives obtained on the basis of electric drives dynamic models. Unknown drives parameters as functions of links rotation angles or other unknown factors, are proposed to be determined experimentally. Such two-step procedure allowed to get drive control in the form of algebraic and transcendental expressions. Finally, by applying the developed software, simulation results of the manipulator end effector moving to the specified positions on the edge of the working area are presented. The resulting error (without accounting measurement error) does not exceed 2 centimeters at the 1.2 meters distance by arm reaching maximum of length ability. The work was performed under the Federal program of developing a robotic device for underwater research in shallow depths (up to 10 meters).

**Keywords:** underwater research device, anthropomorphic manipulator, nonlinear system, terminal state method, terminal control, Denavit-Hartenberg kinematic model, manipulator dynamic model.

**Balabanov Alexey** — Ph.D., Associate professor, Department of informatics and control in technical systems in institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: control systems optimization and synthesis. The number of publications — 20. alexey.balabanov83@gmail.com; 25, October Revolution Ave., 299057, Sevastopol, Russia; office phone: +7 (978) 012-4469.

**Bezuglaya Anna** — Ph.D., Associate professor, Department of informatics and control in technical systems in institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: robotics. The number of publications — 31. anna\_bezuglaya@list.ru; 19, Kolobova St., 299038, Sevastopol, Russia; office phone: +7 (978) 709-33-78.

**Shushlyapin Evgeny** — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Department of informatics and control in technical systems in institute of information technologies and control in technical systems, Sevastopol State University. Research interests: nonlinear systems control. The number of publications — 141. 6u6@bk.ru; 16, Molodykh stroiteley St., 299006, Sevastopol, Russia; office phone: +7 (8692) 435-130.

**Acknowledgements.** Studies were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 14.578.21.0264, project RFMEFI57818X0264).

## References

1. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // MarketsandMarkets. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-underwater-vehicles.asp>. (Last issue: 20.04.2020).
2. Casalino G., Caccia M., Caiti A., Antonelli G., Indiveri G., Melchiorri C., Caselli S. MARIS: A National Project on Marine Robotics for InterventionS, in: Proc. 22nd Mediterranean Conf. on Control and Automation, MED'14, IEEE, 2014, pp. 864 - 869.
3. Lane D.M., Maurelli F., Larkworthy T., Caldwell D., Salvi J., Fox M., Kyriakopoulos K. PANDORA: Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning // IFACPapersOnLine. Volume 48. Issue 2. 2015. pp. 238–243.
4. Sanz P.J., Ridao P., Oliver G., Casalino G., Petillot Y., Silvestre C., Melchiorri C., Turetta A. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions // 2013 OCEANS - San Diego, 23-27 Sept. 2013. pp.1 – 10.
5. [Development and research of a robotic system for performing underwater technical work in conditions of limited visibility using a high-resolution 3D-vision com-Plex system] Razrabotka i issledovanie robototekhnicheskogo kompleksa dlja vypolnenija podvodno-tehnicheskikh rabot v uslovijah ogranichennoj vidimosti s ispol'zovaniem kompleksnoj sistemy 3D-zrenija vysokogo razreshenija / A.A.Kabanov, V.A. Kramar, E.A. Shushljapin i dr. // [Research report] Otchet o NIR (№AAAA-A18-11812259008). Sevastopol', SevGU, 2018. (In Russ.).
6. Kabanov A.A., Balabanov A.N. The modeling of an anthropomorphic robot arm // MATEC Web of Conferences 224, Vol. 224, 2018 (Proceedings of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822404024>.
7. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research. URL: <https://dfnc.ru/kosmos/fedor-robot-poletel-v-kosmos/> (Date of issue 24.02.2020) (In Russ.).
8. [Underwater manipulators] Podvodnye manipulyatory URL: [http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017\\_LFL\\_manip.pdf](http://www.oceanos.ru/s1/files/File/2017_LFL_manip.pdf) (Date of issue 15.01.2020) (In Russ.).
9. [Autonomous underwater robot-crab] Avtonomnyj podvodnyj robot-krab URL: <https://ria.ru/science/20180419/1518950715.html> (Date of issue 04.09.2019) (In Russ.).
10. [Lightweight underwater five-stage electric manipulator] Oblegchennyj podvodnyj pjatistepennoj jelektromanipulyator. URL: <http://www.tetis-pro.ru/news/803/> (Date of issue 24.01.2020). (In Russ.).
11. [Underwater robot of polytechnics «Odyssey»] Podvodnyj robot politehnikov «Odissej» URL: [https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy\\_robot\\_politehnikov\\_pozvolit\\_o&print=1](https://news.tpu.ru/news/2016/11/11/26198/?title=podvodnyy_robot_politehnikov_pozvolit_o&print=1) (Date of issue 05.09.2019) (In Russ.).
12. Vu N.Thi-Thuy, Tran N.P., Nguyen N.H. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Path Planning for Excavator Arm // Hindawi Journal of Robotics, Volume 2018 |Article ID 2571243. 7 pages.

13. Han X., Yin M., Liu X., Yin G. Solution of inverse kinematics and movement trajectory simulation for 6R robot // *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*. vol. 47, no. 6, 2015, pp. 185–190.
14. She M., Tian L. A Novel Path Control Algorithm for Networked Underwater Robot // *Hindawi Journal of Robotics*. Volume 2018. Article ID 1520981.
15. Ananthanarayanan H., Ordóñez R. Real-time Inverse Kinematics of  $(2n + 1)$  DOF hyper-redundant manipulator arm via a combined numerical and analytical approach // *Mechanism and Machine Theory*. vol. 91. 2015. pp. 209–226.
16. Legowski A. The global inverse kinematics solution in the adept six 300 manipulator with singularities robustness // *Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS 2015*. Romania. 2015. pp. 90–97.
17. Mahmoodabadi M. J., Ziaei A. Inverse Dynamics Based Optimal Fuzzy Controller for a Robot Manipulator via Particle Swarm Optimization // *Hindawi Journal of Robotics*, Volume 2019. Article ID 5052185.
18. Mendili M., Bouani F. Predictive control of mobile robot using kinematic and dynamic models // *Journal of Control Science and Engineering*. vol. 2017. Article ID 5341381,
19. LIN Y. Solution of Inverse Kinematics for General Robot Manipulators Based on Multiple Population Genetic Algorithm // *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 3. 2017. p. 1.
20. Momani S., Abo-Hammour Z.S., Alsmadi O.M.K. Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms // *Applied Mathematics & Information Sciences*. vol. 10, no. 1. 2016. pp. 225–233.
21. Wang H-J, Fu Y.,Zhao Z-Q, Yue Y-J. An Improved Ant Colony Algorithm of Robot Path Planning for Obstacle Avoidance // *Hindawi Journal of Robotics*. Volume 2019. Article ID 6097591.
22. Kong H., Li N., Shen Y. Adaptive double chain quantum genetic algorithm for constrained optimization problems // *Chinese Journal of Aeronautics*. vol. 28. no. 1, 2015. pp. 214–228.
23. Lv X., Zhao M. Application of Improved BQGA in Robot Kinematics Inverse Solution // *Hindawi Journal of Robotics*. Volume 2019. Article ID 1659180
24. Zhao M., Dai Y. Application of fuzzy ant colony algorithm to robotics arm inverse kinematics problem // *ICIC Express Letters*. vol. 10. no. 1. 2016. pp. 43–49.
25. Zhang Y.F., Ma Z.S. A simulated annealing neural network solution to inverse kinematics of EOD manipulator // *Computer Measurement & Control*. vol. 23. no. 4. 2015. pp. 1269–1272.
26. Shushlyapin E.A., Bezuglaya A.E. [Control of anthropomorphic robot using terminal state method] *Upravlenie antropomorfnyh robotom metodom konechnogo sostoyaniya* // [Automation and instrumentation: problems, solutions APR-2019", Sevastopol, 09 - 13 September 2019. Materials of the IV International scientific and technical conference / "Automation and measurement in machine-instrument engineering"] "Avtomatizacija i priborostrojenije: problemy, reshenija APPR-2019". Sevastopol. 09 – 13 sentyabrya 2019 g. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencij / "Avtomatizacija i izmerenija v mashino- priborostrojenij". №3(7). 2019. pp. 38–47. (In Russ.).
27. Denavit J., Hartenberg R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // *Transactions ASME Journal of Applied Mechanics*. 23, 1955. pp. 215–221.
28. Shushlyapin E.A. [Control of nonlinear systems based on the forecast end-state unmanaged traffic] *Upravlenie nelinejnymi sistemami na osnove prognoza konechnogo sostoyaniya neupravlyaemogo dvizheniya*. Sevastopol: SevNTU, 2012. 282p. ISBN 978–617–612–048–3. (In Russ.).

29. Alekseev V.M. [On one estimate perturbations of ordinary differential equations] Ob odnoj ocenke vozmushchenij obyknovennyh differentsialnyh uravnenij. [Bulletin of the Moscow University. Ser.1 Mathematics, mechanics] Vestn. Moskov. un-ta. Ser.1. Matematika, mekhanika. 1961. №2. pp. 28–36. (In Russ.).
30. Shushlyapin E.A., Karapetian V.A., Bezuglaja A.E., Afonina A.A. [Nonlinear Regulators for Deduction of the Vessel on the Set Trajectory at "Strong" Maneuvers] Nelinejnye regulatory dlia uderzhania sudna na zadannoj traektorii pri "silnikh" manevrakh // Proceeding of SPIIRAS. 2017. St. Pb: SPIIRAS, Issue. 53. pp. 178–200. (In Russ).
31. Shushlyapin E.A., Bezuglaya A.E. Analytical Synthesis of Regulators for Nonlinear Systems with a Terminal State Method on Examples of Motion Control of a Wheeled Robot and a Vessel // Hindawi Journal of Applied Mathematics, vol. 2018 Article ID 4868791, 2018, 13 pages.

D. TRUNG, N. TUAN, N. BANG, T. TUYEN  
**SYNTHESIS OF LINE OF SIGHT ANGLE COORDINATE FILTER  
 ON THE BASIS OF INTERACTIVE MULTI-MODEL  
 EVALUATION ALGORITHM**

*Trung D., Tuan N., Bang N., Tuyen T. Synthesis of Line of Sight Angle Coordinate Filter on the Basis of Interactive Multi-Model Evaluation Algorithm.*

**Abstract.** On the basis of the tracking multi-loop target angle coordinate system, the article has selected and proposed an interactive multi-model adaptive filter algorithm to improve the quality of the target phase coordinate filter. In which, the 3 models selected to design the line of sight angle coordinate filter; Constant velocity (CV) model, Singer model and constant acceleration model, characterizing 3 different levels of maneuverability of the target. As a result, the evaluation quality of the target phase coordinates is improved because the evaluation process has redistribution of the probabilities of each model to suit the actual maneuvering of the target. The structure of the filters is simple, the evaluation error is small and the maneuvering detection delay is significantly reduced. The results are verified through simulation, ensuring that in all cases the target is maneuvering with different intensity and frequency, the line of sight angle coordinate filter always accurately determines the target angle coordinates.

**Keywords:** flight equipment, target, maneuver, angle of line of sight, interactive multi-model.

**1. Introduction.** In the flight equipment, the target angular coordinate determination system is actually the tracking system that determines the target coordinate parameters. In an angle measuring device, the directional device generates signals that are proportional to the target tracking error according to the angle. This error in the vertical plane is determined by the angle  $\Delta\varphi_d$ , between the signal balance direction of the antenna and the target direction [1-3]. Figure 1,  $O_a$  and  $O_t$  - the position of the control object (flight equipment) and the target in the non-rotation coordinate system  $X_0 O_a Y_0$ , attached to the flight equipment.

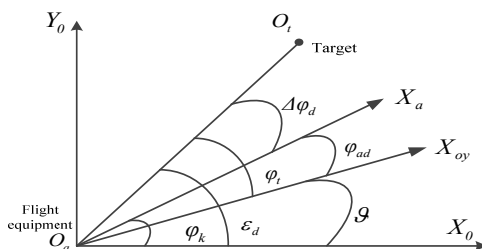


Fig. 1. Motion correlation between the flight equipment and the target



where:  $O_a X_{oy}$  - longitudinal axis of the flight equipment;

$O_a X_a$  - the signal balance directional of the directional device;

$\varepsilon_d$  - angle of the line of sight to target in the inertial coordinate system  $X_0 O_a Y_0$ ;

$\varphi_t$  - angle of the line of sight compared to the longitudinal axis of the flight equipment;

$\varphi_{ad}$  - the angle of rotation of the antenna compared to the longitudinal axis of the flight equipment (the directional angle of the antenna);

$\mathcal{G}$  - flight equipment nodding angle;

$O_a O_t$  - the flight equipment line of sight;

$\Delta\varphi_d$  - angle difference between the signal balance line and the line of sight.

The task of the problem determines the coordinates of the target angle: Generates angle  $\varepsilon_d$  and  $\omega_d$  speed coordinate evaluations of the line of sight. On the current flight equipment control systems, the determination of  $\varepsilon_d$  and  $\omega_d$  is done by the tracking one-loop angular coordinate determination system [4-7]. With this method,  $\varepsilon_d$  and  $\omega_d$  are received using directly the signals from the antenna transmission system  $\varphi_{ad}$  and from gyros measure the longitudinal axis angle  $\mathcal{G}$ . The evaluation error  $\varepsilon_d$  and  $\omega_d$  of this method will be large, especially in the case of the maneuvering target, due to the fact that the antenna has large inertia [3, 8-11].

Based on the application of optimal control theory and optimal filtration theory, the target angle coordinate determination system on current flight equipment is built with the tracking multi-loop [12, 13]. This coordinate determination system has a smaller error than the tracking one-loop system, especially in the case of a maneuvering target, because  $\varepsilon_d$  and  $\omega_d$  are evaluated by a separate tracking loop without using directly the  $\varphi_{ad}$  signal as an evaluation signal [3, 14].

However, the tracking multi-loop coordinate determination system only takes into account the maneuvering target situation with specific values of maneuvering intensity ( $\sigma_{j_i}^2$ ) and maneuvering frequency ( $\alpha_j$ ). That is, it remains unresolved for the class of the problem taking into account the diverse maneuverability in the reality of the target. Therefore, when the actual maneuvering of the target is not consistent with the hypothetical

model used to synthesize the coordinate system, the evaluation error  $\varepsilon_d$  and  $\omega_d$  will increase.

Therefore, the task set out for the article: based on the tracking multi-loop coordinate determination system, building an algorithm to improve the accuracy of the target angle coordinates in maneuvering target conditions.

When applying optimal control theory and optimal filter theory, the problem of synthesizing systems to determine the target angle coordinates can be divided into two problems, namely:

The antenna control problem so that the signal balance line ( $O_a X_a$ ) coincides with the direction of the line of sight ( $O_a O_t$ ). This problem has been solved [3] or the optimal control technique [4, 9] can be used to synthesize the control law, so the article does not set out, but only applies the results when necessary.

The problem of evaluating the phase coordinate of the line of sight  $\varepsilon_d$ ,  $\omega_d$  takes into account the interaction of other parameters ( $\vartheta$ ,  $\varphi_{ad}$  ...) and the maneuvering of the target. This problem is solved by the article in the direction of synthesizing the adaptive system to improve the accuracy of the target angle coordinates in maneuvering target conditions.

The general method to improve the evaluation  $\varepsilon_d$ ,  $\omega_d$  in maneuverable target conditions is to use adaptive Kalman filtering techniques. Single-model adaptive filtering techniques perform the adaptation on the corrected phase or predictive of the Kalman filter algorithm [4, 15-18]. With these methods, the structure of the filter is relatively simple, however, the evaluation accuracy is not high and the maneuvering detection time is kept slow compared to the multi-model adaptive filtering techniques. In the multi-model adaptive filtration technique, with the assumption that the process follows one of the N known models, the evaluation accuracy is higher and the maneuvering detection delay is significantly reduced [3, 19-20].

## 2. Synthesis of the line of sight angle coordinate filter.

**2.1. Selection of different models for the interactive multi-model evaluation algorithm.** The purpose of the line of sight angle coordinate filter is to evaluate the line of sight angle, line of sight angle speed and target normalization acceleration in order to provide the information required for the flying equipment guide law. With the optimal target angular coordinate system, this filter is designed with the Singer model with fixed parameters. Then, the model's equation of state takes the form [3, 12]:

$$\dot{\varepsilon}_d = \omega_d, \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_d = -\frac{2\dot{D}}{D}\omega_d + \frac{1}{D}(j_t - j_d), \quad (2)$$

$$\dot{j}_t = -\alpha_j j_t + \zeta_{j_t}, \quad (3)$$

where:  $D$  - relative distance between flight equipment and target;

$j_t$  - normal acceleration of the target;

$j_d$  - normal acceleration of the flight equipment;  $\zeta_{j_t}$  - process noise of the model.

Based on this idea, the article adds 2 other models, characteristics for the small and large degree of maneuverability of the target. The model with constant velocity (CV model) and almost constant acceleration model (CA model) to build the interactive multi-model (IMM) evaluation algorithm for the line of sight angle coordinate filter. This choice is derived from the point of view, these 3 models are suitable for 3 different levels of maneuverability of the target.

Thus, the line of sight angle coordinate filter includes 3 linear Kalman filters running in parallel using 3 models, respectively, the CV model, Singer model and CA model. The final state evaluation is a combination of component filters with weighting on the exact probabilities of each model. As a result, the evaluation quality of the target phase coordinates is improved because the evaluation process has a redistribution of the probabilities of each model to suit the actual maneuverability of the target. The specific kinetics model to build these 3 filters is as follows:

– The Kalman 1 filter uses a CV model for synthesis (Fig. 2). This model considers the target normalized acceleration as white noise  $j_t = \zeta$  [5, 12]. In this case, the velocity and angle of the target orbital inclination ( $\theta_t$ )

are almost constant due to  $\dot{\theta}_t = \frac{j_t}{V_t}$  (assuming the target velocity is constant).

This model characterizes the degree of maneuverability of the smallest targets.

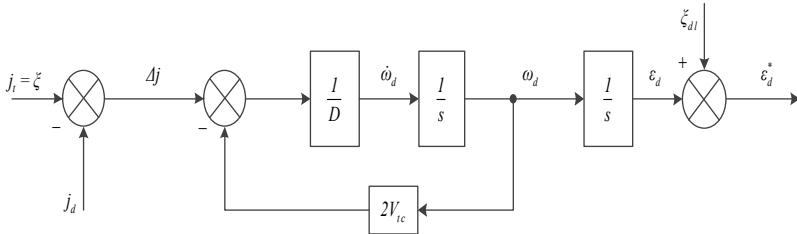


Fig. 2. CV model to synthesize the Kalman filter 1

The model's equation of state takes the form:

$$\dot{\epsilon}_d = \omega_d, \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_d = -\frac{2\dot{D}}{D}\omega_d - \frac{1}{D}j_d + \frac{1}{D}\zeta = \frac{2V_{ic}}{D}\omega_d - \frac{1}{D}j_d + \frac{1}{D}\zeta. \quad (5)$$

Where:  $\frac{\zeta}{D}$  - line of sight angular acceleration noise, due to the uncertainty in the model CV causes,  $V_{ic} = -\dot{D}$  - target approach speed.

The vector form of the system of equations above:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{F}_{mhl}\mathbf{x}_1 + \mathbf{G}_{mhl}\mathbf{u}_1 + \mathbf{w}_1. \quad (6)$$

Where:  $\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} \epsilon_d \\ \omega_d \end{bmatrix}$  - target phase coordinate state vector;

$\mathbf{u}_1 = j_d$  - control signal;

$$\mathbf{F}_{mhl} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{2V_{ic}}{D} \end{bmatrix} \text{ - state transition matrix of filter 1;}$$

$$\mathbf{G}_{mhl} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{D} \end{bmatrix} \text{ - control matrix;}$$

$$\mathbf{Q}_{mhl} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_{a_1}^2}{D^2} \end{bmatrix} \text{ - covariance matrix of process noise.}$$

The discrete model above with cycle  $T$ , the base matrix is calculated as follows:

$$\Phi_{mh}(t) = L^{-1} \{ (pI - F_{mh})^{-1} \}.$$

Inside:  $L^{-1}$  - inverse Laplace transformations,  $I$  - the unit matrix has dimensions consistent with  $F_{mh}$ .

Replace the sampling cycle  $T$  with the variable  $t$  of the base matrix to get the transition matrix  $\Phi_{mh}^k = \Phi(T)$ .

The discrete form control matrix, received by the formula:

$$G_{mh}^k = \int_0^T \Phi_{mh}(t) \cdot G_{mh} dt.$$

The discrete form of the covariance matrix of the process noise:

$$Q_{mh}^k = \int_0^T \Phi_{mh}(t) \cdot Q_{mh} \cdot \Phi_{mh}^T(t) dt.$$

According to the above general formulas, the parameters of the CV model discrete form:

$$\Phi_{mhl} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{D(\beta - 1)}{2V_{tc}} \\ 0 & \beta \end{bmatrix} \text{ - state transition matrix;}$$

$$G_{mhl} = \begin{bmatrix} \frac{T}{2V_{tc}} - \frac{D(\beta - 1)}{4V_{tc}^2} \\ \frac{1 - \beta}{2V_{tc}} \end{bmatrix} \text{ - control matrix.}$$

The covariance matrix of the process noise discrete form as follows:

$$Q_{mh_l}(1, 1) = \left( \frac{\frac{D(\beta^2 - 1)}{4V_{tc}} - \frac{D(\beta - 1)}{V_{tc}} + T}{4V_{tc}^2} \right) \sigma_{a_l}^2,$$

$$\mathbf{Q}_{m_{h_i}}(1, 2) = \mathbf{Q}_{m_{h_i}}(2, 1) = \left( \frac{\beta^2 - 1}{8V_{tc}^2} - \frac{\beta - 1}{4V_{tc}^2} \right) \sigma_{a_i}^2,$$

$$\mathbf{Q}_{m_{h_i}}(2, 2) = \frac{\beta^2 - 1}{4V_{tc}^2 D} \sigma_{a_i}^2.$$

Inside:  $\beta = e^{\frac{2V_{tc}T}{D}}$ ,  $T$  - discrete cycle.

$\sigma_{a_i}^2$  - process noise variance, which is characteristic of the maneuvering intensity.

– Filter Kalman 2 uses the Singer model (Fig. 3) to describe the target's movement [5, 12-13]. This model characterizes the moderate maneuverability of the target, shown through the selection of two fixed parameters, maneuvering frequency  $\alpha_j$  and maneuvering intensity  $\sigma_{a_i}^2$ . The kinetics of model 2 has the following form:

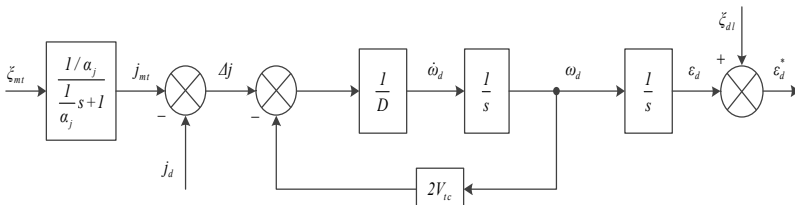


Fig. 3. Singer model to synthesize the Kalman filter 2

In the above model, the input inertia stage  $\left( \frac{1/\alpha_j}{s/\alpha_j + 1} \right)$  is the shaping filter. To create the target maneuvering style with constant intensity and the moment of maneuverability evenly distributed during flight time, the spectral density function of process noise  $\zeta_{j_i}$  has the form:

$$\sigma_{a_2}^2 = \frac{j_{max2}^2}{T_f}.$$

Where:  $j_{max2}$  - maximized target normal acceleration, maneuverable;  
 $T_f$  - flight time.

Equation of state of model 2 (Singer model).

The above equation is in vector form:

$$\dot{\varepsilon}_d = \omega_d, \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_d = \frac{2V_{tc}}{D} \omega_d + \frac{1}{D} j_t - \frac{1}{D} j_d, \quad (8)$$

$$\dot{j}_t = -\alpha_j j_t + \zeta_{j_t}. \quad (9)$$

The above equation is in vector form:

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{F}_{mh2} \mathbf{x}_2 + \mathbf{G}_{mh2} \mathbf{u}_2 + \mathbf{w}_2.$$

Inside:  $\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \omega_d \\ j_{td} \end{bmatrix}$  - target phase coordinate state vector;

$$\mathbf{F}_{mh2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{2V_{tc}}{D} & \frac{1}{D} \\ 0 & 0 & -\alpha_j \end{bmatrix} \text{ - state transition matrix of filters 2;}$$

$$\mathbf{G}_{mh2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{D} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ - control matrix;}$$

$$\mathbf{Q}_{mh2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sigma_{a_2}^2 \text{ - covariance matrix of process noise.}$$

Similarly, we have the parameters of model 2 in discrete form:

$$\Phi_{mh2} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{D}{2V_{tc}}(\beta - 1) & \frac{e^{-\alpha T}}{\alpha(2V_{tc} + D\alpha)} - \frac{1}{2V_{tc}\alpha} + \frac{D\beta}{2V_{tc}(2V_{tc} + D\alpha)} \\ 0 & \beta & \frac{\beta - e^{-\alpha T}}{2V_{tc} + D\alpha} \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix},$$

$$G_{mh2} = \begin{bmatrix} \frac{T}{2V_{tc}} + \frac{D(1 - \beta)}{4V_{tc}^2} \\ \frac{1 - \beta}{2V_{tc}} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ - control matrix.}$$

Covariance matrix of the process noise discrete form as follows:

$$Q_{mh_2}(1,1) = \frac{(e^{-\alpha T} - 1)\left(\frac{8V_{tc}^2}{\alpha} + 4DV_{tc}\right) + T(D^2\alpha^2 + 4DV_{tc}\alpha + 4V_{tc}^2) - (\beta - 1)\left(\frac{D^3\alpha^2}{V_{tc}} + 2D^2\alpha\right)}{4D^2V_{tc}^2\alpha^4 + 16DV_{tc}^3\alpha^3 + 16V_{tc}^4\alpha^2},$$

$$\frac{-\frac{2V_{tc}^2}{\alpha}(e^{-2\alpha T} - 1) + \frac{D^3\alpha^2(\beta^2 - 1)}{4V_{tc}} + \frac{4D^2V_{tc}\alpha}{2V_{tc} - D\alpha}(e^{\frac{2V_{tc}T}{D} - \alpha T} - 1)}{4D^2V_{tc}^2\alpha^4 + 16DV_{tc}^3\alpha^3 + 16V_{tc}^4\alpha^2} \cdot \sigma_{a_2}^2,$$

$$Q_{mh_2}(1,2) = Q_{mh_2}(2,1) = \frac{D\left(e^{\frac{2V_{tc}T}{D} - \alpha T} - 1\right) - (\beta - 1)\left(\frac{D^2\alpha}{2V_{tc}} + D\right) - (e^{-\alpha T} - 1)\left(D + \frac{2V_{tc}}{\alpha}\right)}{2D^2V_{tc}\alpha^3 + 8DV_{tc}^2\alpha^2 + 8V_{tc}^3\alpha},$$

$$+\frac{V_{tc}(e^{-2\alpha T} - 1)}{\alpha} + \frac{D^2\alpha(\beta^2 - 1)}{4V_{tc}} \cdot \sigma_{a_2}^2$$



$$Q_{mh_2}(1,3) = Q_{mh_2}(3,1) = \frac{(e^{-\alpha T} - 1)(D + \frac{2V_{tc}}{\alpha}) - \frac{V_{tc}}{\alpha}(e^{-2\alpha T} - 1) + \frac{D^2\alpha(e^{\frac{2V_{tc}T}{D} - \alpha T} - 1)}{2V_{tc} - D\alpha}}{4V_{tc}^2\alpha + 2DV_{tc}\alpha^2} \cdot \sigma_{a_2}^2,$$

$$Q_{mh_2}(2,2) = \frac{\frac{1 - e^{-2\alpha T}}{2\alpha} + \frac{D(\beta^2 - 1)}{4V_{tc}} - \frac{2D(e^{\frac{2V_{tc}T}{D} - \alpha T} - 1)}{2V_{tc} - D\alpha}}{D^2\alpha^2 + 4DV_{tc}\alpha + 4V_{tc}^2} \cdot \sigma_{a_2}^2,$$

$$Q_{mh_2}(2,3) = Q_{mh_2}(3,2) = \left( \frac{e^{-2\alpha T} - 1}{2(D\alpha^2 + 2V_{tc}\alpha)} + \frac{D(\beta e^{-\alpha T} - 1)}{4V_{tc}^2 - D^2\alpha^2} \right) \sigma_{a_2}^2,$$

$$Q_{mh_2}(3,3) = \frac{1 - e^{-2\alpha T}}{2\alpha} \sigma_{a_2}^2.$$

– Filter 3 is synthesized based on the CA model (Fig.4). This model considers the target normal acceleration is almost constant (also known as the Jerk acceleration model is approximately equal to 0) [5, 12-13]. This model characterizes a high degree of maneuverability, when the target is to maneuver continuously at nearly constant acceleration.

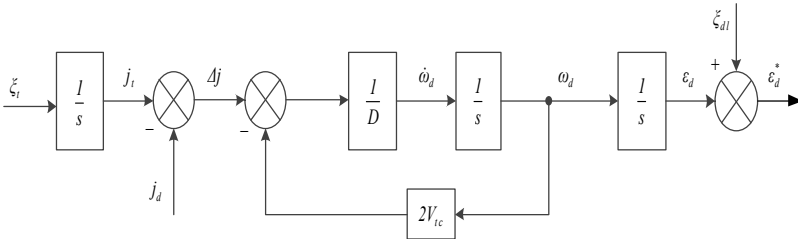


Fig. 4. CA model for synthesis of Kalman filter 3

Then, the model's equation of state takes the form similar to (7), (8):

$$\dot{\epsilon}_d = \omega_d, \tag{10}$$

$$\dot{\omega}_d = \frac{2V_{tc}}{D}\omega_d + \frac{1}{D}j_t - \frac{1}{D}j_d, \tag{11}$$

$$\dot{j}_i = \xi_{j_i}^z. \quad (12)$$

In which, the input integral stage is the shaping filter. Similarly, to create the target maneuvering style with constant intensity and the moment of maneuverability evenly distributed during flight time, the spectral density function of process noise  $\xi_{j_i}^z$  has the form:

$$\sigma_{a_3}^2 = \frac{j_{max3}^2}{T_f}.$$

Where:  $j_{max3}$  - maximized target normal acceleration, maneuverable,  $T_f$  - flight time.

Note, when designing each filter, the spectral density of the process noise in the Singer and CA models is different, due to the different maneuvering intensity.

Equation of state in vector form:

$$\dot{\mathbf{x}}_3 = \mathbf{F}_{mh3}\mathbf{x}_3 + \mathbf{G}_{mh3}\mathbf{u}_3 + \mathbf{w}_3. \quad (13)$$

Inside:  $\mathbf{x}_3 = \begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \omega_d \\ j_{id} \end{bmatrix}$  - Target phase coordinate state vector.

$\mathbf{F}_{mh3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{2V_{tc}}{D} & \frac{1}{D} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  - State transition matrix of filters 3.

$\mathbf{G}_{mh3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{D} \\ 0 \end{bmatrix}$  - Control matrix.

$$\mathbf{Q}_{mh3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sigma_{a_3}^2 - \text{Covariance matrix of process noise.}$$

Switch to the discrete model, we have:

$$\Phi_{mh3} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{D(\beta-1)}{2V_{tc}} & \frac{D(\beta-1)}{4V_{tc}^2} - \frac{T}{2V_{tc}} \\ 0 & \beta & \frac{\beta-1}{2V_{tc}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{State transition matrix.}$$

$$\mathbf{G}_{mh3} = \begin{bmatrix} \frac{T}{2V_{tc}} + \frac{D}{4V_{tc}^2}(1-\beta) \\ \frac{1-\beta}{2V_{tc}} \\ 0 \end{bmatrix} - \text{Control matrix.}$$

Covariance matrix of the process noise discrete form as follows:

$$Q_{mh_3}(1,1) = \left( \frac{D^3(\beta^2-1)}{64V_{tc}^5} + \frac{D^2T}{16V_{tc}^4} - \frac{D^2T\beta}{8V_{tc}^4} + \frac{DT^2}{8V_{tc}^3} + \frac{T^3}{12V_{tc}^2} \right) \sigma_{a_3}^2,$$

$$Q_{mh_3}(1,2) = Q_{mh_3}(2,1) = \left( \frac{D^2(\beta^2-1)}{32V_{tc}^4} + \frac{DT}{8V_{tc}^3} - \frac{DT\beta}{8V_{tc}^3} - \frac{D^2(\beta-1)}{16V_{tc}^4} + \frac{T^2}{8V_{tc}^3} \right) \sigma_{a_3}^2,$$

$$Q_{mh_3}(1,3) = Q_{mh_3}(3,1) = \left( \frac{D^2(\beta-1)}{8V_{tc}^3} - \frac{DT}{4V_{tc}^2} - \frac{T^2}{4V_{tc}} \right) \sigma_{a_3}^2,$$

$$Q_{mh_3}(2,2) = \left( \frac{D(\beta^2-1)}{16V_{tc}^3} - \frac{D(\beta-1)}{4V_{tc}^3} + \frac{T}{4V_{tc}^2} \right) \sigma_{a_3}^2,$$

$$Q_{mh_3}(2,3) = Q_{mh_3}(3,2) = \left( \frac{D(\beta - 1)}{4V_{tc}^2} - \frac{T}{2V_{tc}} \right) \sigma_{a_3}^2,$$

$$Q_{mh_3}(3,3) = T\sigma_{a_3}^2,$$

where  $\beta = e^{\frac{2V_{tc}T}{D}}$ ,  $T$  - discrete cycle.

**2.2. The algorithm to evaluate the coordinates of the line of sight angle with 3 different models.** On the basis of the interactive multi-model filtering algorithm [15, 19-21], we have a general block diagram describing the evaluation algorithm of the line of sight angle coordinates shown in Figure 5.

The process of implementing the evaluation algorithm of the line of sight angle speed filter is as follows:

Step 1. Call  $p_{ij}$ , ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ) – the probability of changing from the model  $i$  at time  $(k-1)$  to the model  $j$  at time  $k$ . This probability is constant throughout the evaluation process. We choose the model transfer probability matrix as follows:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,9995 & 0,0001 & 0,0004 \\ 0,0004 & 0,9995 & 0,0001 \\ 0,0001 & 0,0004 & 0,9995 \end{bmatrix}.$$

In which, model 1 is CV, model 2 is Singer and model 3 is CA.

Call  $\mu_j(0)$  - model probability at the time of initialization. In the beginning, the true probabilities of the 3 models are equal, so:

$$\mu_{CV}(0) = \mu_{SINGER}(0) = \mu_{CA}(0) = \frac{1}{3}.$$

Step 2. Calculate the mixing probability, that is, the appearance probability of the  $i^{th}$  model at time  $(k-1)$  with the  $j^{th}$  model condition at time  $k$ .

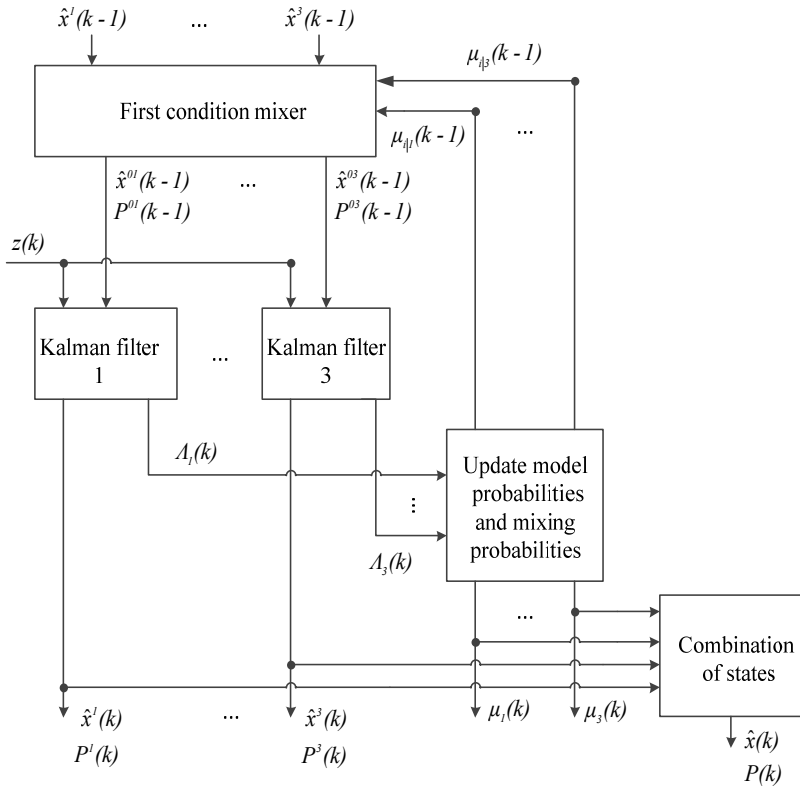


Fig. 5. Block diagram of line of sight angle coordinate filter with 3 component Kalman filters:  $\mu_{ij}(k-1)$  is defined as:

$$\mu_{ij}(k-1) = \frac{1}{\bar{c}_j} p_{ij} \mu_i(k-1); \text{ with } i, j = 1, 2, 3; \quad (14)$$

$$\bar{c}_j = \sum_{i=1}^3 p_{ij} \mu_i(k-1); \text{ with } j = 1, 2, 3 .$$

Step 3. Mix the first condition for the  $j^{th}$  filter:

Input status, after mixing:

$$\hat{\mathbf{x}}^{0j}(k-1) = \sum_{i=1}^3 \hat{\mathbf{x}}^i(k-1)\mu_{i|j}(k-1); \text{ With } j = 1, 2, 3; \quad (15)$$

correlation of input errors, after mixing:

$$\hat{\mathbf{x}}^{0j}(k-1) = \sum_{i=1}^3 \hat{\mathbf{x}}^i(k-1)\mu_{i|j}(k-1); \text{ With } j = 1, 2, 3; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^{0j}(k-1) &= \sum_{i=1}^3 \mu_{i|j}(k-1) \left\{ \mathbf{P}^i(k-1) + \left[ \hat{\mathbf{x}}^i(k-1) - \hat{\mathbf{x}}^{0j}(k-1) \right] \left[ \hat{\mathbf{x}}^i(k-1) - \hat{\mathbf{x}}^{0j}(k-1) \right]^T \right\} \hat{\mathbf{x}}^{0j}(k-1) \\ &= \sum_{i=1}^3 \hat{\mathbf{x}}^i(k-1)\mu_{i|j}(k-1); \text{ With } j = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (17)$$

Due to the fact that the state vector size in the CV model is 2, and the Singer model and the CA model are 3, we need to solve the problem of mixing three models with different state vector sizes. In [15, 22-24] has proposed several ways to solve the problem. Here, we simply choose that when mixing for the CV model (model with smaller state space size), we only mix the corresponding state components in the Singer and CA model, ignoring the states remaining. When mixing for Singer and CA models (the model with larger state space size), we consider the missing state components in the CV model to zero.

Step 4. Perform evaluation algorithm of each component filter, with the first conditions, is mixed:

Evaluate the a priori of each filter:

$$\hat{\mathbf{x}}^j(k) = \Phi_k^j \hat{\mathbf{x}}^j(k-1) + \mathbf{G}_k^j \hat{\mathbf{u}}^j(k-1); \quad (18)$$

inside:  $\Phi_k^j$  - state transition matrix corresponding to the model  $j$ ;  $\mathbf{G}_k^j$  - control matrix corresponding to the model  $j$ .

Calculate the a priori error correlation matrix of each filter:

$$\mathbf{P}^j(k) = \Phi_k^j \mathbf{P}^{0j}(k-1) [\Phi_k^j]^T + \mathbf{Q}_k^j(k-1).$$

Calculate the Kalman amplification matrix:

$$\mathbf{K}^j(k) = \mathbf{P}^j(k) \mathbf{H}_j^T(k) \times \left[ \mathbf{H}_j(k) \mathbf{P}^j(k) \mathbf{H}_j^T(k) + \mathbf{R}_k^j(k) \right]^{-1}. \quad (19)$$

Inside,  $R_k^j(k) = \sigma_z^2$  - variance of observed channel noise. Here, we consider the variance of the measurement noise in all three models to be equal.

With the CV model, the Kalman amplification coefficient is only 2:

$$K_1^j(k) = \frac{P_{11}^j(k)}{P_{11}^j(k) + \sigma_z^2},$$

$$K_2^j(k) = \frac{P_{12}^j(k)}{P_{11}^j(k) + \sigma_z^2}.$$

The Singer and CA models are respectively:

$$K_1^j(k) = \frac{P_{11}^j(k)}{P_{11}^j(k) + \sigma_z^2},$$

$$K_2^j(k) = \frac{P_{12}^j(k)}{P_{11}^j(k) + \sigma_z^2},$$

$$K_3^j(k) = \frac{P_{13}^j(k)}{P_{11}^j(k) + \sigma_z^2}.$$

Evaluate the posterior state (after measurement update) of each filter:

$$\hat{\mathbf{x}}^j(k) = \hat{\mathbf{x}}^{-j}(k) + \mathbf{K}^j(k) \left[ \mathbf{z}(k) - \mathbf{H}^j(k) \hat{\mathbf{x}}^{-j}(k) \right]. \quad (20)$$

The posterior correlation matrix of each filter:

$$\mathbf{P}^j(k) = \left[ \mathbf{I} - \mathbf{K}^j(k) \mathbf{H}^j(k) \right] \mathbf{P}^j(k).$$

Step 5. Calculate the logical function for the filter  $j^{th}$ :

$$A_j(k) = N \left[ \mathbf{z}(k); \hat{\mathbf{z}}^j \left[ k \mid k-1; \hat{\mathbf{x}}^{0j}(k-1 \mid k-1) \right], S^j \left[ k, \mathbf{P}^{0j}(k-1 \mid k-1) \right] \right]. \quad (21)$$

It means,  $A_j(k) = N \left[ e^j(k); 0; S^j(k) \right]$ , inside:

$$e_j(k) = z(k) - \mathbf{H}^j \hat{\mathbf{x}}^j(k-1),$$

$$S_j(k) = \mathbf{H}_j \left[ \Phi_k^j \mathbf{P}^{0j}(k-1) [\Phi_k^j]^T + \mathbf{Q}_k^j \right] \mathbf{H}_j^T + \mathbf{R}_k^j,$$

$$A_j(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S_j(k)}} \exp\left(-\frac{1}{2} e_j^T(k) S_j^{-1}(k) e_j(k)\right),$$

$$A_j(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S_j(k)}} \exp\left(-\frac{1}{2 S_j(k)} e_j^2(k)\right).$$

Step 6. Updated  $j^{\text{th}}$  model probabilities:

$$\mu_j(k) = \frac{1}{c} A_j(k) \bar{c}_j; \quad (22)$$

$$c = \sum_{j=1}^3 A_j(k) \bar{c}_j - \text{normalized constants.}$$

Step 7. Combination of evaluation states and error correlation matrix after updating the correct probabilities of each model.

Combination of evaluation states:

$$\mu_j(k) = \frac{1}{c} A_j(k) \bar{c}_j. \quad (23)$$

Combination of error correlation:

$$\mathbf{P}(k) = \sum_{j=1}^3 \mu_j(k) \left\{ \mathbf{P}^j(k) + [\hat{\mathbf{x}}^j(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)] [\hat{\mathbf{x}}^j(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)]^T \right\}.$$

**3. Simulation results and analysis.** To survey the quality of the tracking multi-loop target angle coordinate system using the interactive multi-model filtering algorithm, we will simulate the angular coordinate system with different maneuvering styles of the target in the horizontal plane (Fig. 6). Then, compare with the quality of the optimal angular



coordinate system (with fixed parameters based on Singer model) according to the criteria of mean square error (MSE).

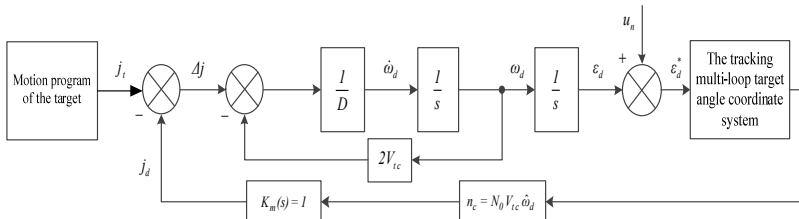


Fig. 6. Diagrams simulation of the target angle coordinates system in the ideal flight equipment control loop

**3.1. In the case of a ladder type maneuvering target:**

- The target’s initial position:  $x_t(0) = 40 (km)$  ;  $y_t(0) = 0 (km)$  .
- The flight equipment initial position:  $x(0) = 0 (km)$ ,  $y(0) = 0 (km)$  .
- The target flies in at velocity:  $350 (m / s)$  .
- The flight equipment velocity:  $1000 (m / s)$  .
- The target’s initial trajectory tilt angle:  $\theta_t = 0^\circ$  .
- The normal acceleration of the target:

$$j_t = \begin{cases} 0 & \text{when } t < 20s \\ 30 (m / s^2) & \text{when } t \geq 20s \end{cases} \quad (24)$$

With this model, initially, the target has evenly straight movement. After 20 seconds, the target suddenly maneuvers continuously with constant normal acceleration  $30 (m / s^2)$  . Thus, the target has a change from a non-maneuverable model to maneuverability with constant normal acceleration. This motion model has uncertainty in maneuvering moment and maneuvering intensity. The simulation results of the target angle coordinate system for the case of ladder-type maneuvering targets are as follows (Fig. 7, 8). Figures 10-17 reflect other features of the analyzed process.

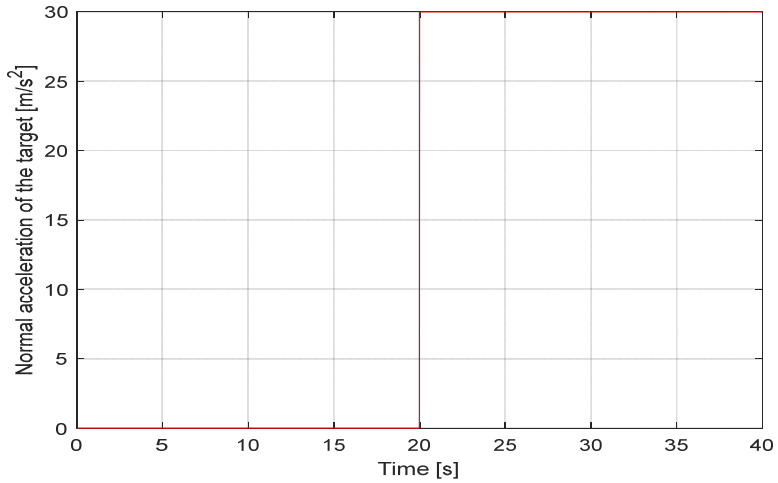


Fig. 7. Normal acceleration of the target

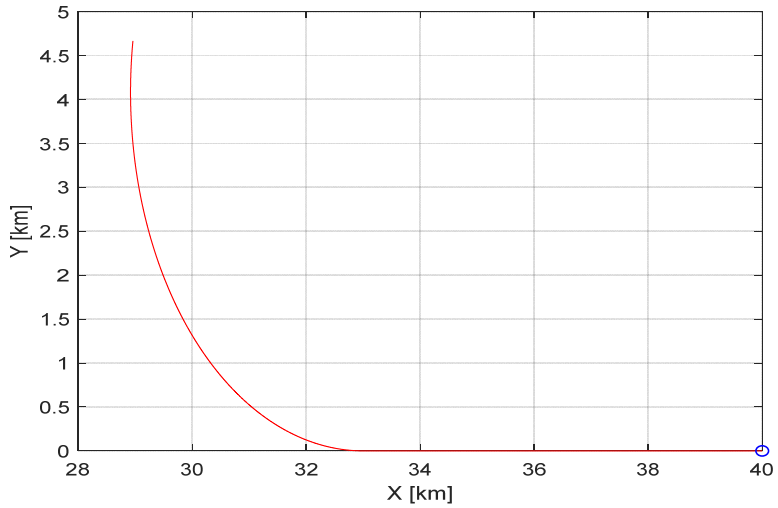


Fig. 8. Ladder-type maneuvering target trajectory

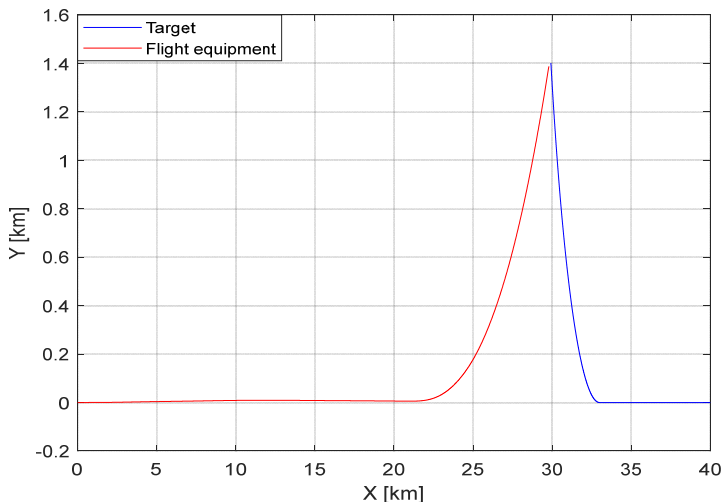


Fig. 9. Flight equipment - target trajectory

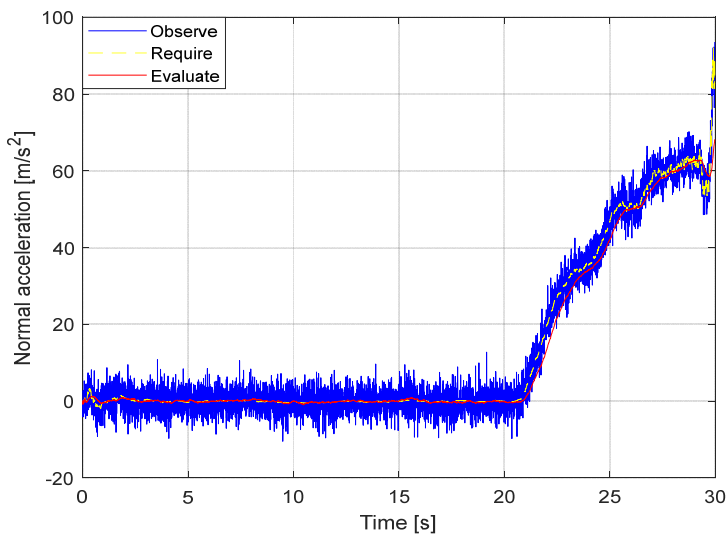


Fig. 10. Normal acceleration of the flight equipment

After 20 seconds of steady straight movement, the maneuvering target with constant normal acceleration. This causes the required normal acceleration of the small missile at an early stage (before 20 seconds), then increases continuously until the meeting point. However, the flight equipment normal acceleration filter still gives a good evaluation.

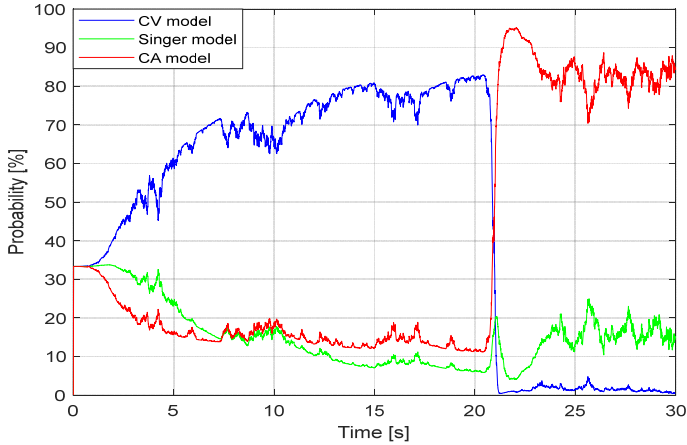


Fig. 11. The graph shows the correct probabilities of the model

Figure 11 shows that from 0 to 20 seconds, the CV model dominates, but after about 22 seconds (the transition time of the IMM algorithm is about 2 seconds), the probability of the CA model is clearly dominant compared to the other 2 models. This trend continues to maintain in the remaining maneuverable time of the target. This evaluation result of the algorithm reflects quite correctly with the actual maneuvering of the target.

The results of evaluating the target phase coordinate for the case of ladder-type maneuvering target are as follows:

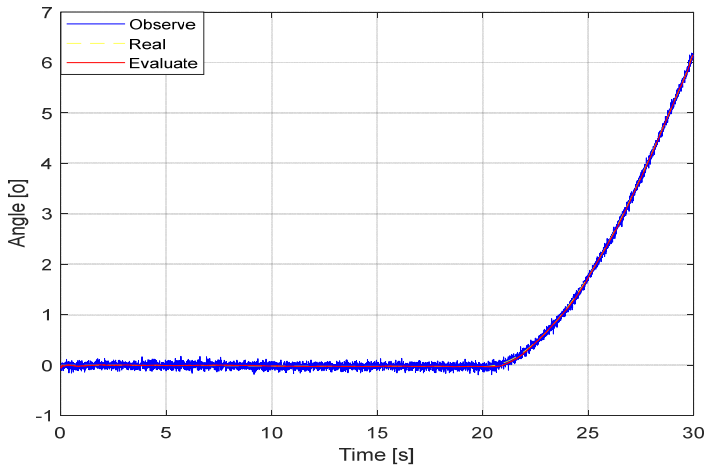


Fig. 12. Evaluate the angle of the line of sight

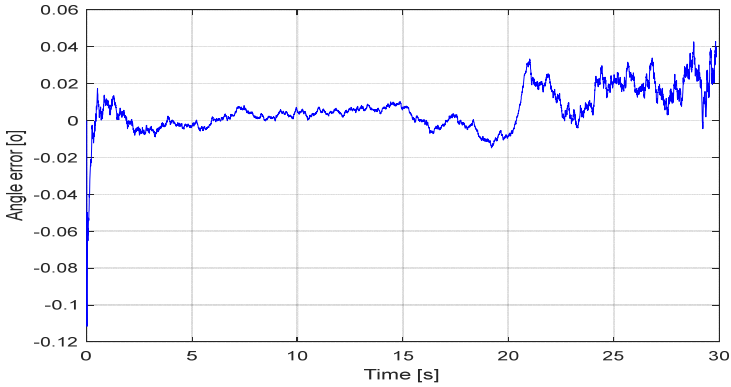


Fig. 13. Evaluation error of the line of sight angle

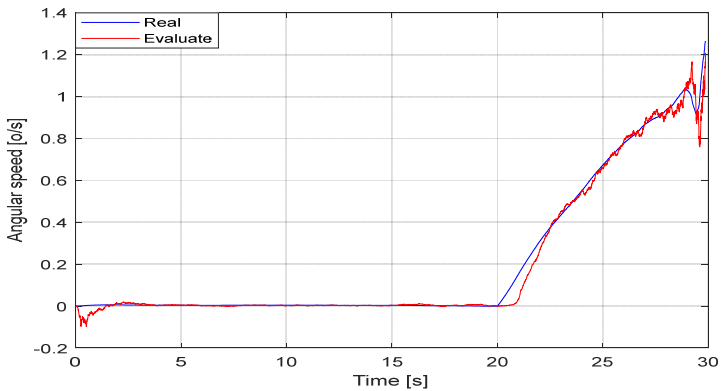


Fig. 14. Speed evaluation the angle of the line of sight

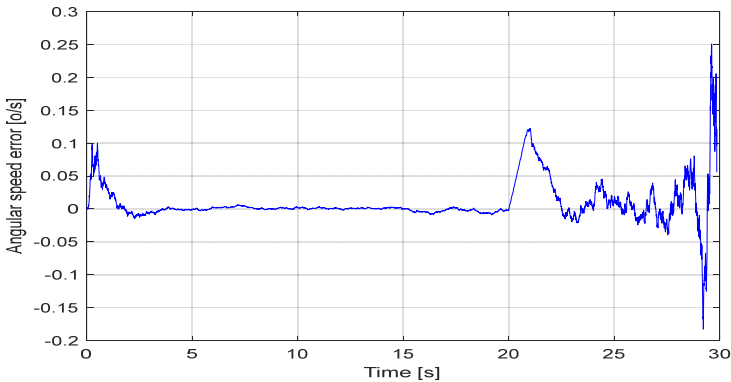


Fig. 15. Evaluation error of the line of sight angle speed

The simulation results show that in all 3 states: the angle of view, the angle of view and the normal acceleration of the target, the IMM evaluation algorithm gives a greater error at the time the target starts to maneuver (model change time). But right after that, the clinging error is smaller. Compare the quality of the IMM filter algorithm with the optimal filter algorithm after 100 Monte-Carlo runs:

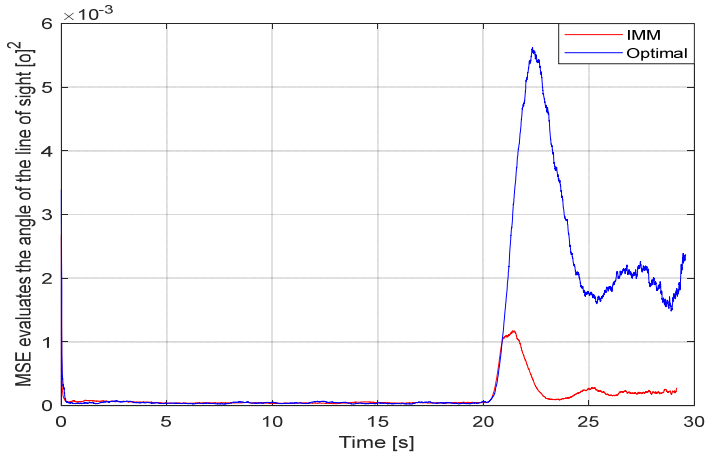


Fig. 16. Compare the MSE to evaluate the angle of the line of sight

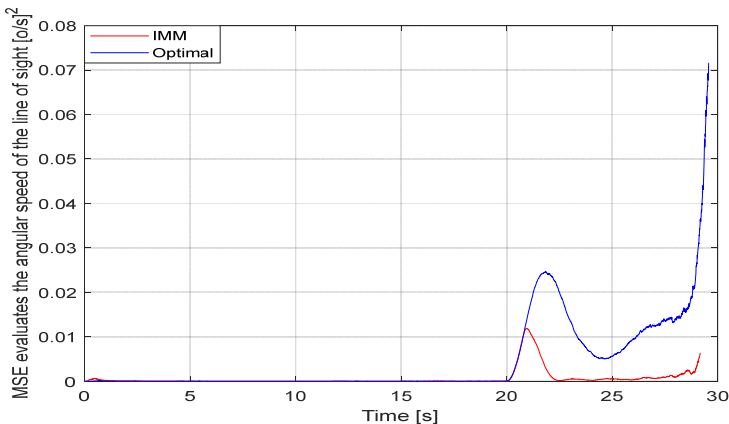


Fig. 17. Compare the MSE to evaluate the angular speed of the line of sight

Before the maneuvering target time (20s), the evaluation quality of the two algorithms was equivalent (the evaluation error of the optimal filtering algorithm was trivial smaller). But after 20 seconds, there is the

difference in evaluation quality. Detail:

– With the line of sight angle, the evaluation error of the IMM algorithm at the time of maneuvering model transfer (change) is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 1,2 \cdot 10^{-3} [(o)^2]$ , also the optimal filtering is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 2,5 \cdot 10^{-3} [(o)^2]$ . Then, at the stable tracking stage, the optimal filter algorithm for error is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 0,85 \cdot 10^{-3} [(o)^2]$ , the IMM algorithm is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 0,25 \cdot 10^{-3} [(o)^2]$ .

– With the angular speed of the line of sight, the evaluation error of the IMM algorithm at the time of maneuvering model transfer is  $MSE(\omega_d) \approx 0,012 [(o/s)^2]$ , also the optimal filtering is  $MSE(\omega_d) \approx 0,015 [(o/s)^2]$ . At the stable tracking stage, the optimal filter algorithm for error is  $MSE(\omega_d) \approx 0,004 [(o/s)^2]$ , the IMM algorithm is  $MSE(\omega_d) \approx 0,001 [(o/s)^2]$ .

– With the target normal acceleration, at the time of maneuvering model transfer, both algorithms give large evaluation errors  $MSE(j_t) \approx 900 [(m/s^2)^2]$ . At the stable tracking stage, the optimal filter algorithm for error is  $MSE(j_t) \approx 220 [(m/s^2)^2]$ , while the IMM filter gives a significantly smaller error with  $MSE(j_t) \approx 10 [(m/s^2)^2]$ .

Obviously, when the maneuvering target with constant acceleration, the evaluation quality of the target angular coordinate system using the IMM filter algorithm improved when compared to the optimal filter algorithm.

**3.2. In the case, the maneuvering target according to the Singer model.** The parameters of the initial position, the velocity of the flight equipment and the target remain the same as before, but differ in the target normal acceleration.

The target normal acceleration is generated from the following kinematic model:

$$j_t(k) = (1 - T \cdot \alpha_{j_t}) j_t(k-1) + T \cdot u \quad (25)$$

Where:  $\alpha_{j_t} = 1 (1/s)$ ,  $T$  - discrete integral cycle,  $u$  - control signal or maneuver command.

$$u = \begin{cases} 0 & \text{when } t < 5s \\ 40 \cdot \alpha_{j_t} (m/s^2) & \text{when } 5s < t < 15s \\ 0 & \text{when } t \geq 15s \end{cases} \quad (26)$$

With this model, initially, the target has evenly straight movement. After 5 seconds, the target begins to maneuver in a Singer model with a command acceleration is  $40(m/s^2)$ . After 15 seconds, the target reverted to its non-maneuver style. Thus, this motion model has uncertainty in maneuvering moment, maneuvering time and maneuvering intensity.

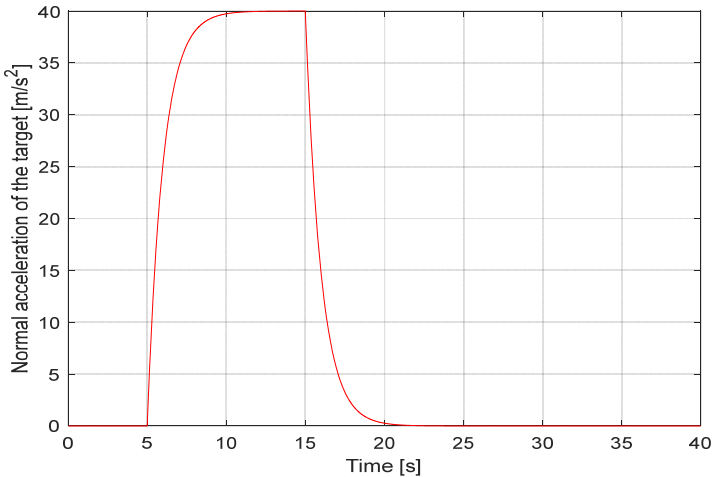


Fig. 18. Normal acceleration of the target

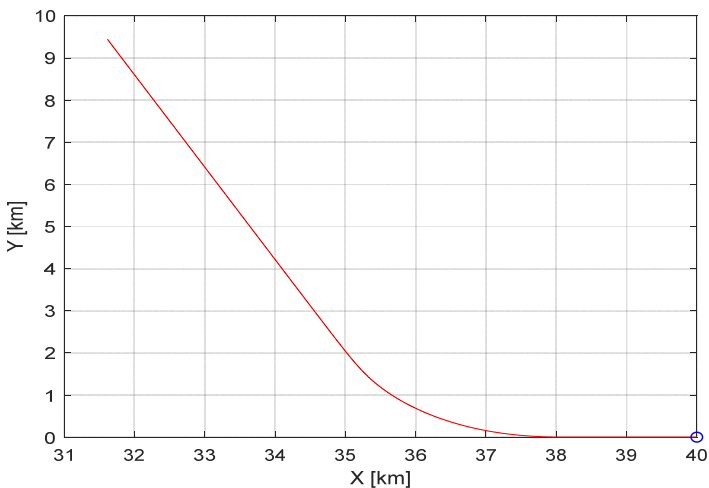


Fig. 19. Singer style maneuvering target trajectory



The simulation results of the target angle coordinate system for the maneuvering target case according to Singer model are as follows:

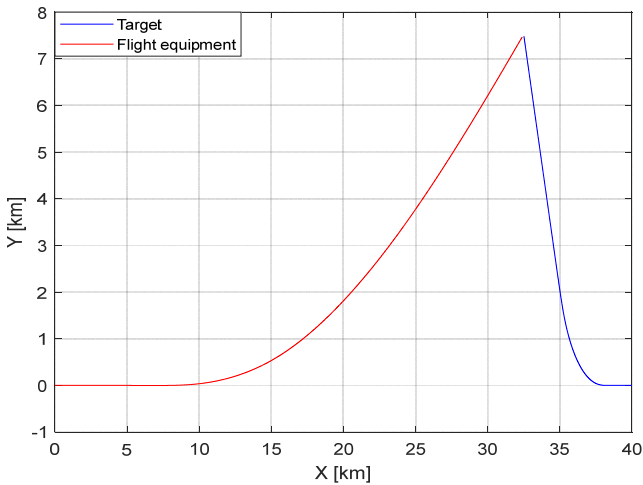


Fig. 20. Flight equipment - target trajectory

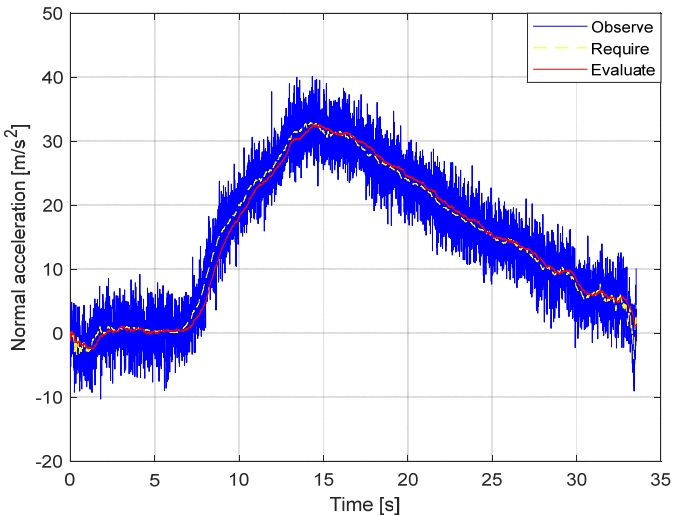


Fig. 21. Normal acceleration of the Flight equipment

When the target starts to maneuver, the normal acceleration requires an increase and when the target changes to the non-maneuver model, the required normalized acceleration of flight equipment tends to decrease to 0.

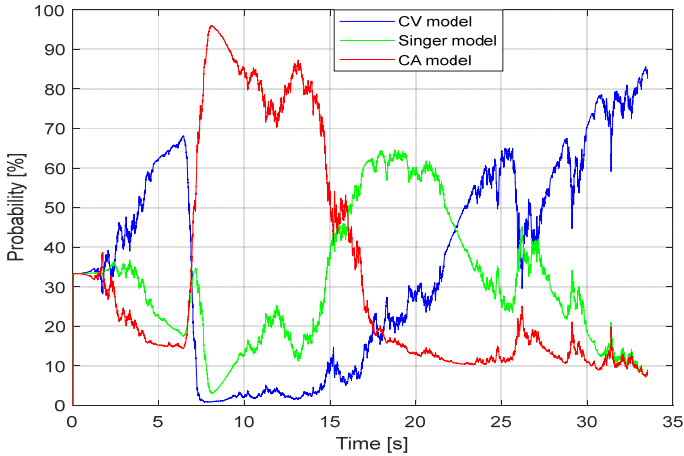


Fig. 22. Graphs update model probabilities

Obviously, when the target has evenly straight movement in the first 5 seconds, the CV model dominates over the other 2 models. In the time of the maneuvering target (5 ÷ 15s), the CA and Singer models dominate again, in which the weight of the CA model is greater because the target maneuvering command, in this case, is quite large ( $40 m/s^2$ ) makes the CA model fit with more practical. And when the target ends maneuver time, the correct probability belongs to the CV model.

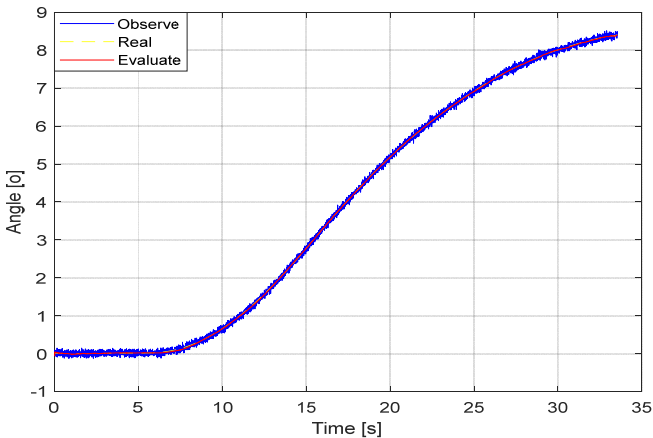


Fig. 23. Evaluate the angle of the line of sight

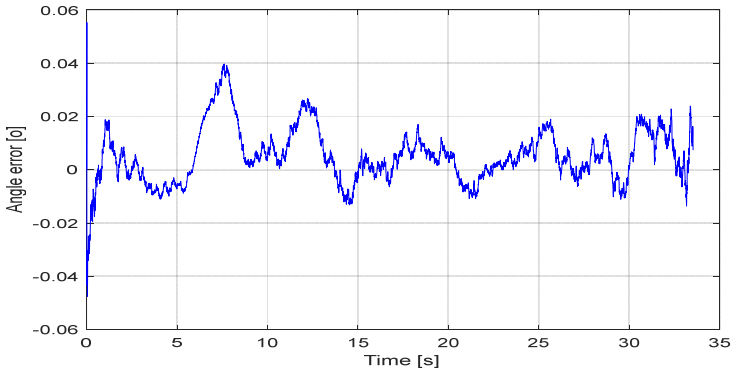


Fig. 24. Evaluation error the angle of the line of sight

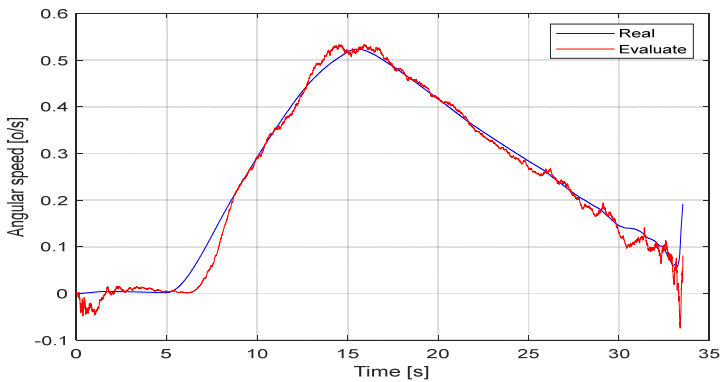


Fig. 25. Evaluate the angular speed of the line of sight

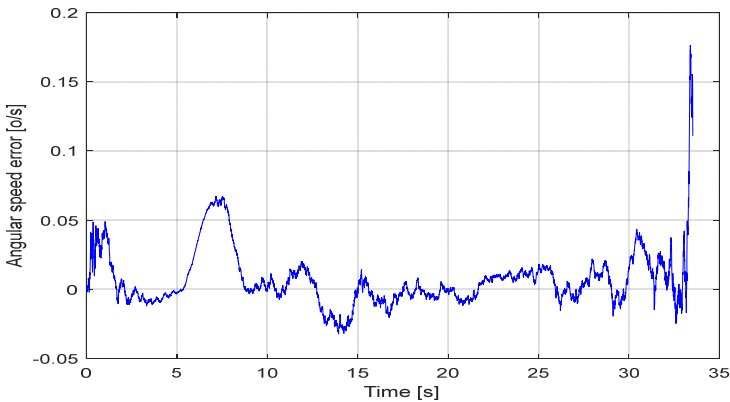


Fig. 26. Evaluation error the angular speed of the line of sight

Similar to the case of a maneuvering target with constant normal acceleration, in this case, all 3 target phase coordinates have a larger evaluation error at the time of model transfer (from non-maneuver to maneuver and on the contrary), but then IMM filter algorithm gives smaller evaluation error.

Comparing the quality of the IMM filter algorithm with the optimal filtration algorithm after 100 runs of Monte-Carlo for the case of Singer style maneuvering target gives the following results:

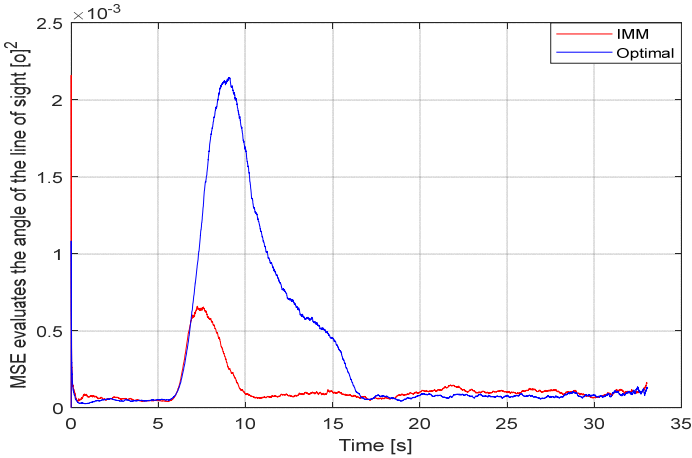


Fig. 27. Compare the MSE to evaluate the angle of the line of sight

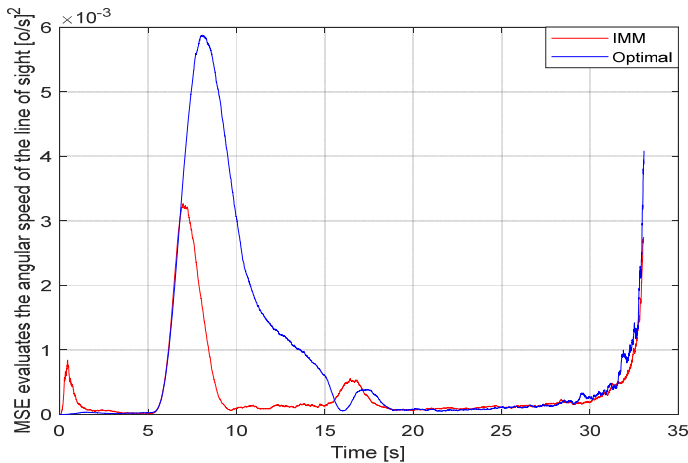


Fig. 28. Compare the MSE to evaluate the angular speed of the line of sight

MSE simulation results show that in the non-maneuver target stages (before 5 seconds and after 15 seconds), the evaluation quality of the line of sight angle coordinate filter when using the IMM filter algorithm is slightly worse when compared with the optimal filtering algorithm. However, at the maneuvering target stage (5 ÷ 15 seconds), the evaluation error of the IMM algorithm is significantly smaller. Detail:

– At the moment the target starts to maneuver, for the optimal filtering algorithm is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 2,2 \cdot 10^{-3} (o)^2$ ,  $MSE(\omega_d) \approx 6,1 \cdot 10^{-3} (o / s)^2$ ,  $MSE(j_i) \approx 1000 (m / s^2)^2$ ; also for the IMM filtering algorithm is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 0,6 \cdot 10^{-3} (o)^2$ ,  $MSE(\omega_d) \approx 3,2 \cdot 10^{-3} (o / s)^2$ ,  $MSE(j_i) \approx 850 (m / s^2)^2$ .

– At the stable tracking stage, for the optimal filtering algorithm is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 0,7 \cdot 10^{-3} (o)^2$ ,  $MSE(\omega_d) \approx 1,7 \cdot 10^{-3} (o / s)^2$ ,  $MSE(j_i) \approx 600 (m / s^2)^2$ ; also for the IMM filtering algorithm is  $MSE(\varepsilon_d) \approx 0,1 \cdot 10^{-3} (o)^2$ ,  $MSE(\omega_d) \approx 0,15 \times 10^{-3} (o / s)^2$ ,  $MSE(j_i) \approx 30 (m / s^2)^2$ .

**4. Conclusions.** The article has synthesized the line of sight angle coordinates filter between the flight equipment and the target using the interactive multi-model adaptive filter technique. The suboptimal target angle coordinate tracking system is constructed from individual filters and combined with an antenna control system to create a multi-loop target angle coordinate system. Obviously, the target's maneuvering directly influences the evaluation filter the line of sight angle coordinate. So, in order to synthesize the target angle coordinate determination system with high accuracy in the maneuvering target conditions, just need to improve the line of sight angle coordinate evaluation filter, keeping the other filters.

The simulation results of the tracking multi-loop target angle coordinate system show that, when comparing the quality of the line of sight angle coordinate filter using the IMM filter algorithm based on the MSE criteria, the evaluation error is smaller than the optimal filtering algorithm under different maneuvering target conditions. Here, the change of the target maneuvering styles while the flight equipment approaches the target, highlighting the advantages and reliability of the interactive multi-model evaluation algorithm. The advantage is that during the evaluation process, the algorithm will always update the closest approximate model to the actual motion of the target, resulting in a combination of state evolution from the component filters giving results more precisely, the optimal filter has a fixed parameter. Of course, the more models that are taken into account when designing the line of sight angle coordinate filter, the higher the adaptability of the filter to target maneuverability, but we need to

consider the cost of calculation and real-time response of the electronic computer on board.

## References

1. Liu T., Xie Y. A relative navigation algorithm for a chaser tracking a non-cooperative maneuvering target in space. 31(5). 2016. pp. 1338–1344.
2. Jiyuan L., Jun Z., Yingying L. Applying auto-adaptation filter to tracking of maneuvering target in special relative navigation. J. Northwest. Polytech. Univ. 4, 013. 2018.
3. Kanashkova A.I, Merkulov A.I. Aviatsonny'e sistemy radioupravleniya. [Airborne radio control systems]. Radio engineering, Moscow. 2013. (In Russ.).
4. Bar S.Y., RongLi X., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons. 2011.
5. Blackman S., Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems. Artech House. 2009.
6. Shaofeng M., Xinxi F., Yulei L., Zhang W., Xiaomei Z. A variable dimension adaptive IMM tracking algorithm. Electron. Opt. Control 22. (02). 2016. pp. 36-45.
7. Xiu L.H., Jing S.Y. Curve Model of Adaptive Interaction Model Algorithm Tracking Method. Applied Mechanics and Materials. Vol 738-739. March 2018. pp. 344-349.
8. Jiangw L.V.Z., Lan Y. IMM-CKF algorithm based on variable dimension interaction. Comput. Appl. Softw. 30(5). 4–6. 2017.
9. Nguyen N.T., Nguyen D.T., Nguyen V.B. Synthesis of remote control law when taking into dynamics and nonlinearity of the missile stage. Intelligent Systems and Networks (ICISN 2021). Springer. March 2021. pp. 171-180.
10. Xiong, K., Wei, C. Spacecraft relative navigation based on multiple model adaptive estimator. J. Syst. Sci. Math. Sci. 34(07). 2018. pp. 828–837.
11. Sambasiva R., Raj K. Implementation of Adaptive Filter Algorithm for Underwater Acoustic System. International Journal of Recent Trends in Engineering. Vol 2. No.2. 2019. pp. 13-22.
12. Le X.R., Kilkov V.P. A survey of maneuvering target tracking: Approximation techniques for nonlinear filtering. Proceedings of SPIE conference on signal and data processing of small targets. 2014. pp. 537-550.
13. Li X.R., Jilkov V.P. Survey of maneuvering target tracking-part V. IEEE transaction on aerospace and electronic systems. 41 (4). 2015. pp. 1255-1321.
14. Xu B. An adaptive tracking algorithm for bearings-only maneuvering target. International journal of computer science and network security. 7 (1). 2017.
15. Yang C., Blasch E. Characteristic errors of the IMM algorithm under three maneuver models for an accelerating target. In: International Conference on Information Fusion. IEEE. 2018.
16. Yang C.C., Tsung T.K. An interactive dynamic multi-objective programming model to support better land use planning, Land Use Policy, Elsevier, Vol.36. 2016. pp. 13-22
17. Qian G.H., Li, Y., Luo, R.J. One maneuvering frequency and the variance adaptive filtering algorithm for maneuvering target tracking. J. Radars 2(6).2017. pp. 258–264.
18. Kim H.S., Chun Seung Yong. Design of fuzzy IMM algorithm based on Basic Sub-models and Time-varying mode transition probabilities. International journal of control automation and systems. 4 (5). 2016. pp. 559-566.
19. Lee J.B., Joo Y.H., Park J.B. IMM method using intelligent input estimation for maneuvering target tracking, ICCAS 2013. pp. 1278-1282.

20. Nguyen V.B., Nguyen T.T., Dang T.T. Synthesis of parameter recognition algorithm and state evaluation for flight device. *East European Scientific Journal*. Vol 2. No.66. 2021. pp. 10-17.
21. Nguyen V.B., Dang C.V. Synthesis of the maneuver target acceleration determines algorithm. *Journal of natural and technical sciences*. Sputnik Publishing House. No.2 (153). 2021. pp. 145-156.
22. Wu N.E., Youmin Z., Kermin Z. Detection, estimation and accommodation of loss of control effectiveness. *International journal of adaptive control and signal processing*. 14. 2010. pp. 775-795.
23. Kim, H.S., Park, J.G., Lee, D. Adaptive fuzzy IMM algorithm for uncertain target tracking. *Int. J. Control Autom. Syst.* 7(6). 2017. pp. 1001–1008.
24. Jiadong R., Xiaotong Z. Interactive multi-model target Maneuver tracking method based on the adaptive probability correction, *International Conference on Swarm Intelligence, ICSI 2018*. pp. 235-245.

**Trung Dang** — Ph.D., Lecturer, Electric Power University. Research interests: wind power, HVDC systems, power quality, application of modern optimal control in power systems. The number of publications — 4. dangtientrung@gmail.com; 235, Hoang Quoc Viet, 112400, Hanoi, Viet Nam; office phone: +8(491)566-8855.

**Tuan Nguyen** — Ph.D., Lecturer, Le Quy Don University of Science and Technology. Research interests: управление энергосистемой и анализ стабильности энергосистемы, реагирование на потребности интеллектуальной сети, система автоматизации зданий, возобновляемая энергия. The number of publications — 7. ngoctuanhvhnh@gmail.com; 236, Hoang Quoc Viet, 112400, Hanoi, Viet Nam; office phone: +8(496)250-5955.

**Bang Nguyen** — Ph.D., Lecturer, Vietnam Air and Air Defense Forces Academy. Research interests: flying equipment control, intelligent control, signal processing, modeling and simulation. The number of publications — 19. banghvpkkq@gmail.com; 104, Nguyen Van Troi, 112400, Ho Chi Minh City, Viet Nam; office phone: +8(498)466-9384.

**Tuyen Tran** — Ph.D., Lecturer, Le Quy Don University of Science and Technology. Research interests: power system control and power system stability analysis, smart grid demand response, building automation system, renewable energy. The number of publications — 5. thaisonmos@gmail.com; 236, Hoang Quoc Viet, 112400, Hanoi, Viet Nam; office phone: +8(497)558-0368.

Д.Т. ЧУНГ, Н.Н. ТУАН, Н.В. БАНГ, Т.В. ТУЙЕН  
**СИНТЕЗ ФИЛЬТРА КООРДИНАТ УГЛА ПРЯМОЙ  
ВИДИМОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРАКТИВНОГО  
МНОГОМОДЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ**

*Чунг Д.Т., Туан Н.Н., Банг Н.В., Туйен Т.В. Синтез фильтра координат угла прямой видимости на основе интерактивного многомодельного алгоритма оценки.*

**Аннотация.** На основе отслеживающей многоконтурной системы координат целевого угла в статье был выбран и предложен интерактивный многомодельный алгоритм адаптивного фильтра для улучшения качества фильтра целевых фазовых координат. Алгоритм интерактивной многомодельной оценки способен адаптироваться к динамике цели по мере продвижения процесса оценки к наиболее подходящей модели. Данный алгоритм имеет 3 модели, выбранные для разработки фильтра координат угла прямой видимости: модель постоянной скорости (CV), модель Зингера и модель постоянного ускорения, характеризующие 3 различных уровня маневренности цели. В результате, качество оценки фазовых координат цели улучшается, поскольку процесс оценки имеет перераспределение вероятностей каждой модели в соответствии с фактическим маневрированием цели. Структура фильтров проста, ошибка оценки мала, а задержка обнаружения маневрирования значительно сокращается. Результаты проверяются посредством моделирования, гарантируя, что во всех случаях цель маневрирует с разной интенсивностью и частотой, фильтр координат угла прямой видимости всегда точно определяет угловые координаты цели. Метод синтеза системы координат цели, использованный в статье, может быть расширен и применен к системам сопровождения целей в РЛС управления огнем, размещенных под землей.

**Ключевые слова:** летное оборудование, цель, маневр, угол прямой видимости, интерактивная мультимодель.

**Чунг Данг Тянь** — канд. техн. наук, преподаватель, Электроэнергетический университет. Область научных интересов: ветроэнергетика, системы постоянного тока, качество электроэнергии, применение современного оптимального управления в энергосистемах. Число научных публикаций — 4. dangtientrung@gmail.com; Хоанг Куок Вьет, 235, 112400, Ханой, Вьетнам; р.т.: +8(491)566-8855.

**Туан Нгуен Нгок** — канд. техн. наук, преподаватель, Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона. Область научных интересов: power system control and power system stability analysis, smart grid demand response, building automation system, renewable energy. Число научных публикаций — 7. ngoctuanhvhn@gmail.com; Хоанг Куок Вьет, 236, 112400, Ханой, Вьетнам; р.т.: +8(496)250-5955.

**Банг Нгуен Ван** — канд. техн. наук, преподаватель, Академия ВВС и ПВО. Область научных интересов: управление летательной аппаратурой, интеллектуальное управление, обработка сигналов, моделирование и симуляция. Число научных публикаций — 19. banghvpkkq@gmail.com; Нгуен Ван Трой, 104, 112400, Хошимин, Вьетнам; р.т.: +8(498)466-9384.

**Туйен Тран Ван** — канд. техн. наук, преподаватель, Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона. Область научных интересов: управление энергосистемой и анализ стабильности энергосистемы, реагирование на потребности



интеллектуальной сети, система автоматизации зданий, возобновляемые источники энергии. Число научных публикаций — 5. thaisonmos@gmail.com; Хоанг Куок Вьет, 236, 112400, Ханой, Вьетнам; p.t.: +8(497)558-0368.

### Литература

1. Liu T., Xie Y. A relative navigation algorithm for a chaser tracking a non-cooperative maneuvering target in space // 31(5). 2016. pp. 1338–1344
2. Jiyuan L., Jun Z., Yingying L. Applying auto-adaptation filter to tracking of maneuvering target in special relative navigation // J. Northwest. Polytech. Univ. 4, 013. 2018.
3. Канащенкова А.И., Меркулова В.И. Авиационные системы радиоуправления // Радиотехника. Москва. 2013.
4. Bar S.Y., Rong L.X., Kirubarajan T. Estimation with applications to tracking and navigation // Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons. 2011.
5. Blackman S., Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems // Artech House. 2009.
6. Shaofeng M., Xinxi F., Yulei L., Zhang W., Xiaomei Z. A variable dimension adaptive IMM tracking algorithm // Electron. Opt. Control 22.(02). 2016. pp. 36-45.
7. Xiu L. H., Jing S.Y. Curve model of adaptive interaction model algorithm tracking method // Applied Mechanics and Materials. Vol 738-739. March 2018. pp. 344-349.
8. Jiangw L.V.Z., Lan Y. IMM-CKF algorithm based on variable dimension interaction // Comput. Appl. Softw. 30(5). 4–6. 2017.
9. Nguyen. N.T., Nguyen D.T., Nguyen V.B. Synthesis of remote control law when taking into dynamics and nonlinearity of the missile stage // The International Conference on Intelligent Systems & Networks. Springer. March 2021.
10. Xiong K., Wei C. Spacecraft relative navigation based on multiple model adaptive estimator // J. Syst. Sci. Math. Sci. 34(07). 2018. pp. 828–837.
11. Sambasiva R., Raj K. Implementation of adaptive filter algorithm for underwater acoustic System // International Journal of Recent Trends in Engineering. Vol 2. No.2. 2019. pp. 13-22.
12. Le X.R., Kilkov V.P. A survey of maneuvering target tracking: Approximation techniques for nonlinear filtering // Proceedings of SPIE conference on signal and data processing of small targets. 2014. pp. 537-550.
13. Li X.R., Jilkov V.P. Survey of maneuvering target tracking-part V // IEEE transaction on aerospace and electronic systems. 41 (4). 2015. pp. 1255-1321.
14. Benlian X. An adaptive tracking algorithm for bearings-only maneuvering target // International journal of computer science and network security. 7 (1). 2017.
15. Yang C., Blasch E. Characteristic errors of the IMM algorithm under three maneuver models for an accelerating target // In: International Conference on Information Fusion. IEEE. 2018.
16. Yang C.C., Tsung T.K. An interactive dynamic multi-objective programming model to support better land use planning // Land Use Policy, Elsevier, Vol.36. 2016. pp. 13-22
17. Qian G.H., Li Y., Luo R.J. One maneuvering frequency and the variance adaptive filtering algorithm for maneuvering target tracking // J. Radars 2(6).2017. pp. 258–264.
18. Sik K.H., Yong C. S. Design of fuzzy IMM algorithm based on Basic Sub-models and Time-varying mode transition probabilities // International journal of control automation and systems. 4 (5). 2016. pp. 559-566.
19. Bum L. J., Hoon J. Y., Bea P. J. IMM method using intelligent input estimation for maneuvering target tracking // ICCAS 2013. pp. 1278-1282.

20. Nguyen V.B., Nguyen N. T. Synthesis of parameter recognition algorithm and state evaluation for flight device // East European Scientific Journal. Vol 2. No.66. 2021. pp. 10-17.
21. Nguyen V.B, Dang C.V. Synthesis of the maneuver target acceleration determines algorithm // Journal of natural and technical sciences. Sputnik Publishing House. No.2 (153). 2021. pp. 145-156.
22. Wu N.E., Zhang Y., Zhou K. Detection, estimation and accommodation of loss of control effectiveness // International journal of adaptive control and signal processing. 14. 2010. pp. 775-795.
23. Kim H.S., Park J.G., Lee D. Adaptive fuzzy IMM algorithm for uncertain target tracking // Int. J. Control Autom. Syst. 7(6). 2017. pp. 1001–1008.
24. Ren J., Zhang X. Interactive multi-model target maneuver tracking method based on the adaptive probability correction // International Conference on Swarm Intelligence, ICSI 2018. pp. 235-245.

Е.С. БАСАН, Е.С. АБРАМОВ, А.Г. БАСЮК, Н.А. СУШКИН  
**МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК НА СИСТЕМУ НАВИГАЦИИ  
БПЛА**

*Басан Е.С., Абрамов Е.С., Басюк А.Г., Сушкин Н.А. Метод обнаружения атак на систему навигации БПЛА.*

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены вопросы реализации методов защиты беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) от атак спуфинга глобальной системы позиционирования (GPS), для обеспечения безопасной навигации. Глобальная навигационная спутниковая система (GNSS) широко используется для определения местоположения БПЛА и на сегодняшний день является самым популярным навигационным решением. Это связано с простотой и относительно невысокой стоимостью данной технологии, а также точностью передаваемых координат. Тем не менее, существует множество угроз безопасности GPS-навигации. Это в первую очередь связано с природой сигнала GPS, т.к. сигнал передается в открытом виде, поэтому злоумышленник может заблокировать или подделать его. В данном исследовании проведен анализ существующих методов защиты GPS. В рамках исследования был разработан экспериментальный стенд и сценарии атак на систему GPS БПЛА. Далее были собраны данные из журнала полетов БПЛА и проведен анализ кибер-физических параметров, чтобы увидеть влияние атаки на показания бортовых датчиков. Исходя из этого, был предложен новый метод обнаружения аномалий БПЛА, основанный на анализе изменений внутренних параметров БПЛА. Этот метод самодиагностики позволяет БПЛА самостоятельно оценивать наличие изменений в его подсистемах, и выявлять признаки кибератаки. Для выявления атаки БПЛА собирает данные об изменении кибер-физических параметров на протяжении определенного периода времени, затем обновляет эти данные. В результате БПЛА необходимо определить степень различий между двумя временными рядами собранных данных. Чем больше будет степень различий между обновленными данными и предыдущими, тем больше вероятность того, что на БПЛА проводится атака.

**Ключевые слова:** безопасность, атака, навигационная система, беспилотный летательный аппарат, вероятность, технология защиты, угроза, глобальная навигационная спутниковая система.

**1. Введение.** Основная проблема, на решение которой направлено данное исследование, предусматривает необходимость разработки метода детектирования, а в последствии и защиты от атак, направленных на подмену сигнала GPS, с целью повышения защищенности БПЛА. Глобальная навигационная спутниковая система (GNSS) широко используется для определения местоположения во многих гражданских и военных приложениях. Такие приемники GNSS, как GPS, GLONASS, Galileo и Beidou, принимают радиосигналы, передаваемые со спутников. Принятые спутниковые сигналы обрабатываются приемником и получают информацию о местоположении, скорости и времени приемника. Злоумышленник

пытается спроецировать ложное положение или ложную траекторию на целевой GPS-приемник.

Необходимость разработки новых методов и средств обнаружения аномалий, связанных с неисправностями, воздействием со стороны злоумышленника или со стороны окружающей среды на автономный БПЛА в режиме реального времени обусловлена тем, что большинство методов обнаружения аномалий для БПЛА основываются на использовании нейронных сетей или методов, где необходимо сравнивать нормальное поведение с аномальным. При этом создание шаблонов поведения БПЛА само по себе является сложной задачей, кроме того существуют ситуации, которые могут быть ложно приняты за аномальные или нормальные. Например, в случае сильного ветра БПЛА усиливает вращение двигателей, что приводит к ускоренному исчерпанию заряда аккумулятора, такое поведение может быть принято за атаку, направленную на исчерпание ресурсов.

Каждая модель БПЛА имеет собственные шаблоны поведения и диапазоны нормальных значений кибер-физических параметров. Метод детектирования аномалий для БПЛА должен быть универсальным и легко масштабируемым, но из-за большого разнообразия моделей БПЛА и отсутствия стандарта их производства, разработка масштабируемого и легко адаптируемого решения становится сложной.

Актуальность научной проблемы обусловлена тем, что большинство существующих подходов к обнаружению аномалий или атак сложно реализуются и требуют большого количества времени для разработки системы обнаружения. Рассмотрим основные принципы создания системы обнаружения вторжений для БПЛА (СОВ-БПЛА). Система обнаружения вторжений для беспилотных летательных аппаратов (СОВ-БПЛА) разрабатывается с целью обнаружения аномального поведения или непредвиденных действий в сети путем автоматического анализа поведения или анализа на основе заданной гипотезы и/или политик, которые регулируются правилами безопасности данной сети [1]. СОВ-БПЛА отслеживает конфигурацию системы, файлы данных и/или передачу данных по сети, чтобы проверить, присутствует ли атака. Кроме того, СОВ-БПЛА направлена на обнаружение неправомерного использования БПЛА. Неправильное использование может быть определено, как любое нежелательное действие, которое может вызвать какой-либо вред с точки зрения производительности или безопасности всей группы БПЛА. В БПЛА встроена кибер-физическая система, состоящая из датчиков и/или

исполнительных механизмов. Датчики предоставляют данные (или информацию) исполнительному механизму, который может управлять БПЛА. Собранные данные используются для анализа и принятия важных решений, связанных с полетной миссией. Ключевые механизмы СОВ можно классифицировать следующим образом. Это механизмы на основе:

- спецификации [2]: СОВ включает в себя набор соответствующих правил, определенных на основе ожидаемого поведения БПЛА. Эти указанные правила применяются для отслеживания успешных запусков системы БПЛА;

- сигнатур [3]: этот метод направлен на обнаружение известных атак на основе заранее определенных известных сигнатур. При обнаружении аномальных действий запускается операция обнаружения для определения совпадающей сигнатуры, чтобы гарантировать обнаружение вторжения;

- аномалий [3]: аномальное поведение обнаруживается на основе сбоя или нежелательной активности, наблюдаемой в системе. С целью обнаружения известных и/или неизвестных атак этот метод использует механизм обучения или фильтрации, который может значительно улучшить обнаружение неизвестных атак при отсутствии заранее определенных сигнатур неизвестных атак;

- гибридного подхода [4], объединяющего два или более методов обнаружения, таких как спецификация плюс аномалия, чтобы обеспечить строгую политику обнаружения, которая может обнаружить известные и/или неизвестные атаки.

Таким образом, для каждого из существующих методов должны быть заранее собраны и сформированы наборы данных для обучения, либо для построения шаблонов поведения или правил. Такие подходы требуют большого количества времени для сбора данных о БПЛА, а также их реализация может требовать дополнительных вычислительных ресурсов для БПЛА. В случае использования методов, которые основаны на использовании нейронных сетей, для реализации эффективного обнаружения аномалий требуется создание обучающей выборки, которая включает в себя, как правило, большое количество тестовых данных.

На основании вышесказанного научная значимость решения проблемы состоит в необходимости разработки нового подхода, основанного на других математических методах обнаружения аномалий БПЛА без необходимости предварительного сбора большого объема данных и описания нормальных шаблонов поведения. Новый подход может упростить процесс создания системы обнаружения

аномалий, что в дальнейшем будет способствовать более простому внедрению СОВ в БПЛА.

Целью данного исследования является разработка метода детектирования атак в виде подмены сигналов GPS, поступающих на БПЛА, на основании параметров сенсорной системы беспилотного аппарата. Метод должен позволять БПЛА обнаруживать атаку без необходимости предварительных знаний об эталонном изменении сигналов с сенсорных датчиков, в режиме реального времени, автономно.

Метод выявления аномалий поведения БПЛА, возникающих, как в результате проведения атак, так и в результате негативного воздействия со стороны окружающей среды, должен обнаруживать аномалии в режиме реального времени без предварительных затрат на обучение, с низкими требованиями к потреблению ресурсов БПЛА. Данный метод был ранее реализован авторами для анализа аномалий в беспроводной mesh-сети, имитирующей передачу данных в группе БПЛА, а также передачу видеопотока. Метод основан на вычислении значения энтропии, то есть разницы между вероятностными распределениями кибер-физических параметров. Метод показал свою эффективность и способность обнаруживать не только атаки, но и смену шаблонов поведения, а также режимов получения/отправки данных. При этом были получены наборы параметров, которые изменяются как под воздействием различных атак, так и в результате смены режима поведения. Данные наборы параметров оказались различными, степень различий между изменениями также отличалась (то есть можно анализировать интенсивность изменений), что в дальнейшем позволит различать типы атак и типы нормального поведения. Особенностью метода является отсутствие необходимости предварительного составления шаблонов поведения и базы данных для обучения. Данные об изменении параметров нужны только для тестирования и проверки эффективности метода, а также для отладки и установления переменных, с учетом которых метод будет работать лучше. Примером такой переменной может служить время обновления информации о параметрах и длина временного ряда за прошедший и новый период времени, для сравнения друг с другом. Метод также был протестирован на данных, собранных по результатам летных испытаний БПЛА, полученных от полетного контроллера. При этом метод также показал эффективность при выявлении атаки GPS-спуфинг. Таким образом, можно утверждать, что метод может быть масштабирован и применен для различных наборов кибер-физических параметров и типов атак.

**2. Анализ релевантных работ.** Проблема обнаружения атак на БПЛА, является актуальной, так как в первую очередь выполнение функций БПЛА может быть связано с жизненно важными для человека областями. Авторы статьи [1] говорят о том, что подавление сигнала и спуфинг глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) считаются основными угрозами для БПЛА. Это может привести к крушению и потере управления над БПЛА, которые используются в критически важных операциях. Зачастую БПЛА используют навигационные сигналы открытых служб без защиты. Несмотря на то, что для реализации защиты был предложен ряд методов на основе пре- и пост корреляции сигнала, в настоящее время актуальной становится разработка алгоритмов машинного обучения для обнаружения атак подавления и спуфинга. Один из популярных алгоритмов машинного обучения - машинная классификация на основе опорных векторов (C-SVM) используется для детектирования атак на систему навигации БПЛА. В статье [1] авторы предлагают использовать метод C-SVM на этапе приема сигнала в связи с тем, что на этом этапе обработки существует ряд изменений сигнала, которые можно проанализировать. Можно установить соотношение между нормальными измерениями и наблюдаемыми, и детектировать аномалии с помощью классификации C-SVM. Добавление реальных наборов данных спуфинга и подавления к лабораторным наборам данных на этапе обучения C-SVM, позволяет повысить точность исследования. Сравнительный анализ всех четырех экспериментов, представленных в этой статье, показывает, что авторам удалось достичь хороших результатов благодаря следующим аспектам: 1) дополненный обучающий набор данных является актуальным для обнаружения попыток манипулирования сигналами ГНСС; 2) метод C-SVM является эффективным для обнаружения попыток манипуляции сигналами ГНСС.

В статье [2] предлагается метод обнаружения спуфинга GPS, на основе использования системы ориентации и определения курса (AHRS), а также акселерометра для сравнения разницы значений ускорения, полученных от GPS-приемника, и от инерциальной системы навигации, что обеспечивает обнаружение ошибки значения ускорения. Ускорение, полученное от приемника GPS, оценивается с помощью фильтра Калмана. Разница, выявленная между значениями ускорения от GPS-приемника и акселерометра используется для обнаружения спуфинга. Величина ошибки ускорения может использоваться, как переменная решения. Кроме того, предлагается использовать величину северной (или восточной) составляющей ошибки ускорения в качестве другой переменной решения.

Эффективность использования двух переменных решения доказывается путем вычисления вероятности обнаружения спуфинга с учетом заранее определенной вероятности ложной тревоги и обнаружения. Если обе переменные решения используются вместе, удается получить наилучшую вероятность обнаружения спуфинга.

Если отсутствует возможность использования GPS, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для координации полета могут использовать инерциальные датчики. При этом, как правило, возникают погрешности в определении местоположения с помощью инерциальных датчиков, что может привести к аварийной ситуации. Чтобы избежать возникновения недопустимой погрешности датчиков в случае атак с подменой GPS, авторы статьи [3] предлагают методику управления с ограничениями безопасности. Данная методика позволяет адаптировать полет БПЛА путем перепланирования полётного задания для повышения устойчивости к атакам с подменой GPS. Детектор атак используется для обнаружения атак с подменой GPS и обеспечивает переключение между режимами надежного и аварийного управления. Система отслеживания местоположения злоумышленника (ALT) разработана для оценки выходной мощности устройства спуфинга с помощью фильтра Калмана (UKF). Используя оценки от ALT, авторы проектируют контроллер эвакуации (ESC) на основе модели прогнозирующего контроллера (MPC), чтобы БПЛА дислоцировался из зоны действия устройства злоумышленника в течение допустимого времени.

Другие методы предотвращения спуфинга GPS, такие как мониторинг исправности приемника в автономном режиме, измерение отношения сигнал/шум и обнаружение доплеровского сдвига, обсуждаются в [4]. В работе [5] был предложен метод, позволяющий БПЛА обнаруживать источник спуфинга GPS с помощью независимой наземной инфраструктуры, которая непрерывно анализирует содержание и время поступления информации о предполагаемом местоположении БПЛА. Было показано, что предложенный метод эффективен при обнаружении атак спуфинга менее чем за 2 с и позволяет определять местоположение источника поддельного сигнала с точностью до 150 м. В статье [6] для обнаружения и оповещения о потенциальных атаках используется анализ автоматической регуляции усиления сигнала GPS в приемнике GPS.

В работах [7-9] рассматривается возможность использования нескольких приемников для обнаружения атак с подменой GPS. В работе [8] использовались несколько независимых GPS-приемников для обнаружения атак с подменой GPS. Предлагаемый метод



анализирует расстояние между приемниками и последующим измерением расстояния между указанными местоположениями приемников. При одинаковых сигналах GPS измеренные расстояния будут аналогичны ранее зафиксированным расстояниям. Однако при атаке с подменой GPS результаты измерения расстояния будут очень близки к нулю, поскольку все приемники передают информацию, где указано одно и то же местоположение, то есть разницы между приёмниками наблюдаться не будет. Автор работы [7] продемонстрировал возможность использования приемника с двумя антеннами для обнаружения атак с подменой GPS. Предлагаемый метод основан на анализе разницы фаз сигналов, полученных антеннами. Авторы работы [9] предлагают использовать несколько приемников для подтверждения подлинности сигналов GPS на основе сопоставления с сигналом GPS от военных спутников без необходимости его расшифровки. Предложенная методика показала свою эффективность даже тогда, когда приемники перекрестной проверки подделываются.

В статье [10] представлен подход к обнаружению атаки спуфинга GPS на беспилотный летательный аппарат на основе анализа оценки состояния с использованием машины опорных векторов (SVM). SVM используется в качестве инструмента для обнаружения аномалий. В этой работе были разработаны решения для обнаружения и среда моделирования атак с подделкой GPS для оценки функциональности и производительности метода. Подход не требует дополнительного оборудования, поэтому его можно использовать для небольшого БПЛА. С другой стороны, было показано, что, если нарушитель имеет абсолютное знание о позиционировании и траектории БПЛА, он сможет остаться незамеченным системой, вызывая при этом частые ложные срабатывания. В связи с тем что, как правило, нарушитель не знает фактическую траекторию БПЛА, было доказано: риск ложных срабатываний мал. Это означает, что система может обнаружить любую атаку спуфинга. Характеристики метода могут быть улучшены, если БПЛА будет оснащен другими датчиками (например, магнитометром).

Авторы работы [11] предлагают защитный механизм, основанный на концепции совместной локализации [12], который представляет собой методологию, позволяющую БПЛА определять свое реальное местоположение в двухмерной системе координат, используя местоположение трех других БПЛА. Предполагается, что каждый БПЛА имеет средства измерения относительных расстояний до других, соседних БПЛА путем определения расстояния между

БПЛА. При совместной локализации БПЛА выбирает любые три соседние БПЛА для обновления своего местоположения, учитывая, что выбранные БПЛА не лежат на одной прямой. После этого БПЛА может точно определить свое местоположение в двухмерной системе координат. Механизм совместной локализации, описанный в [12], может помочь БПЛА определить свое местоположение. Однако он предложен для случая потери сигналов GPS и не может использоваться напрямую в атаке спуфинга GPS. При атаке спуфинг GPS БПЛА не может доверять своему местоположению по GPS или местоположению других БПЛА. Выбор соседнего БПЛА для механизма совместной локализации сопряжен с риском, поскольку он также может подвергнуться атаке. Для преодоления этого ограничения, авторы [11] предлагают механизм защиты, основанный на том, что злоумышленник, использующий спуфинг GPS, может атаковать только один БПЛА. В предлагаемом механизме для определения своего реального местоположения БПЛА учитывает местоположение четырех соседних аппаратов вместо трех. Путем идентификации БПЛА, находящийся под воздействием атаки, он исключается из расчетов. Предлагаемый механизм имеет те же требования кооперативной локализации, то есть неколлинеарные БПЛА. БПЛА может запрашивать местоположение других аппаратов через связь между БПЛА, и каждый БПЛА должен иметь возможность измерять свои относительные расстояния до соседних БПЛА. Таким образом, необходимо отметить, что данный метод накладывает большое количество ограничений на область его применения. В работе [13] представлен метод противодействия атакам на GPS, основанный на использовании системы технического зрения, которая позволяет дополнительно вычислять скорость БПЛА и некоторые другие показатели и коррелировать их с данными полученными от GPS.

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика методов противодействия атакам на GPS.

Таблица 1. Сравнение существующих методов противодействия атакам на GPS

Тип реализации метода	Тип метода	Достоинства	Недостатки
Программный	Методы на основе сравнения с эталонными значениями	Быстродействие, обнаружение простых атак	Невозможность обнаруживать сложные атаки
	Методы на основе интеллектуального анализа	Повышение качества обнаружения атак, универсальность для разных конфигураций БПЛА	Сложность реализации, энергозатратность
Программно-аппаратный	Методы на основе использования нескольких GPS-приемников	Сложнее атаковать, более высокое качество обнаружения	Сложность реализации, могут поддерживаться не всеми БПЛА. Могут использовать дополнительные ресурсы. Требуется значительная проработка решений. Возможны сложности при реализации.
	Методы на основе использования других типов датчиков	Повышается уровень и скорость обнаружения атаки	Плохо масштабируются из-за того, что конфигурация каждого БПЛА индивидуальна

В результате анализа текущего состояния исследований можно сказать, что задача детектирования и предотвращения атак на систему навигации БПЛА достаточно актуальна [13].

### 3. Разработка и реализация сценария атаки на БПЛА.

Открытый характер структуры сигнала GPS делает его уязвимым для спуфинг атак, которые могут выполняться как открыто, так и скрытно. В первом случае сигнал атакующего транслируется значительно мощнее, чем сигнал, приходящий от спутников. Такая атака выполняется проще, но использует более мощные сигналы и легче обнаруживается [14]. При реализации подхода, когда атака проводится скрытно, мощность сигнала постепенно увеличивается до тех пор, пока целевая система полностью не переключится на транслируемый атакуемым сигнал. Этот подход является более сложным и требует большего количества компонентов и более детальной подготовки, но потребляет меньше энергии и обеспечивает плавный переход целевой

системы на другой сигнал. Данные, полученные с помощью датчиков GPS, могут быть сфальсифицированы, что приводит к ложной оценке положения БПЛА бортовой навигационной системой. Если БПЛА полностью автоматизирован, то бортовая система наведения приведет БПЛА к ложному целевому местоположению или «домашней» наземной станции.

При проведении атаки, важно учитывать ряд факторов для снижения риска обнаружения атаки. В первую очередь нужно определить точную геопозицию и время начала атаки. Если место положения атакуемого БПЛА будет выбрано недостаточно точно, система безопасности БПЛА может обнаружить атаку, и тогда аппарат может перейти на ручное управление или изменить траекторию движения, согласно предустановленному сценарию поведения [15]. Неточность определения времени также может привести к обнаружению атаки или к сбою внутренней синхронизации системы. Все эти факторы необходимо учитывать на подготовительном этапе атаки [16].

Проведение атаки возможно только в том случае, если система управления БПЛА переведена в автоматический режим, и полностью полагается на систему навигации, использующую датчики GPS/ГЛОНАСС. Для БПЛА существует два сценария использования систем навигации в автоматическом режиме: сохранение позиции с фиксированными координатами и движение по заданному маршруту.

Для получения экспериментальных данных и моделирования поведения БПЛА во время атаки и в нормальных условиях был выбран способ натурного моделирования. Для реализации натурного моделирования разработан БПЛА, который включает в себя следующие компоненты:

- полетный контроллер: Pix Hawk 4 (PX4) (прошивка Stable 10.1);
- рама: S500;
- моторы: 2XD2212 920KV по часовой стрелке против часовой стрелки CW бесщеточный двигатель;
- регуляторы оборотов: XT-XINTE 30A;
- телеметрия: 3DR радиотелеметрия 915 МГц 100 мВт воздушно-наземный модуль передачи данных для Pixhawk 4;
- приемник: FS-I6B;
- аккумулятор: ZOP Power 3S 11.1V 4200mAh 40C Lipo Battery XT60 Plug;
- камера: мини-камера: 1200TVL;
- передатчик видео: Eachine TX805 5,8G;

– навигационный модуль: Модуль Ublox Neo-M8N.

Для управления полетом БПЛА использовался планировщик QGroundControl. QGroundControl обеспечивает полный контроль полета и планирование миссий для любого БПЛА с поддержкой протокола MAVLink.

По результатам выполнения миссии формировалось два типа журналов, которые в дальнейшем анализировались.

Типы журнала: Dataflash и Telemetry. Есть два способа записи полетных данных с БПЛА:

– журнал DataFlash можно использовать на плате самого полетного контроллера или PX4, которые можно загрузить после полета;

– журнал телеметрии записывается с помощью программного обеспечения (ПО) Mission Planner (или другой наземной станцией) путем передачи данных от БПЛА по беспроводному каналу на наземную станцию.

Для проведения атаки использовался специализированный радиочастотный модуль HackRF One.

Таким образом, проходила отработка нескольких сценариев нормального полета, а затем нескольких сценариев атаки. Всего было выполнено до 20 тестовых испытаний. В результате испытаний были собраны экспериментальные данные для анализа из журналов логирования. Сценарии атаки.

Один из сценариев заключается в том, что БПЛА, определив свое текущее местоположение, получает статические координаты цели. БПЛА коптерного типа перемещается в заданную точку и фиксирует свое положение в пространстве с сохранением высоты. При внешнем воздействии, например при влиянии природных факторов или другого объекта, система автопилота БПЛА увеличивает обороты двигателей и задает направление, противоположное направлению воздействия, для сохранения заданной позиции. При смещении БПЛА от заданной позиции, система сохранения позиции увеличивает мощность оборотов двигателей в зависимости от дистанции между заданной точкой и фактическим расположением БПЛА. При возвращении в заданную точку работа двигателей переходит в штатный режим поддержания высоты, как показано на рисунке 1.

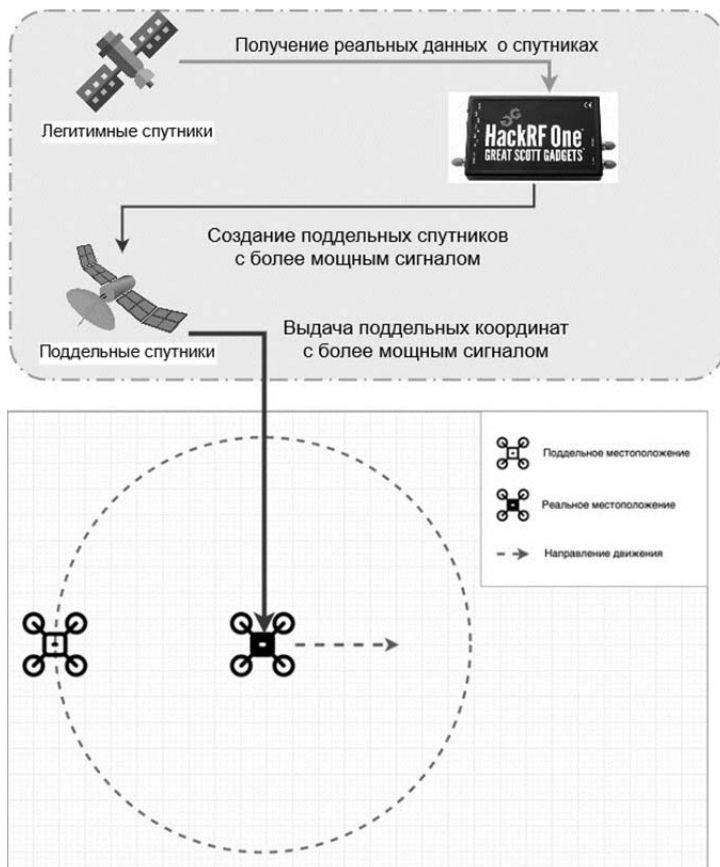


Рис. 1. Сценарий атаки на БПЛА, зависящий надо одной точкой

Из рисунка 1 видно, что когда на БПЛА проводится атака, то он начинает смещаться и изменять свое местоположение, которое было ему изначально задано. Злоумышленник с помощью специализированного оборудования, посылая сигнал большей мощности, передает БПЛА свою информацию от поддельных спутников GPS, тем самым заставляя БПЛА смещаться от заданной позиции. Данное смещение сопровождается также изменением высоты, мощности принимаемого сигнала и иногда сбоями и крушением БПЛА.

Вторым сценарием использования системы навигации в автоматическом режиме является движение по заданному маршруту. Квадрокоптер заранее получает полностью построенный маршрут, и при выполнении миссии движется согласно этой траектории. В случае отклонения от заданной траектории, как и при статической фиксации, БПЛА в автоматическом режиме предпринимает действия по возвращению на маршрут. Помимо применения этого сценария для выполнения заданной миссии или решения задач при движении по маршруту, он может использоваться для обнаружения атак на канал управления.

Транслируя поперечную геопозицию, можно задать вектор направления и скорость движения атакуемого устройства [17]. Изменяя расстояние от поперечной геопозиции до заданной, можно увеличивать или уменьшать скорость движения, для более точного направления и контроля атакуемого БПЛА, как показано на рисунке 2.

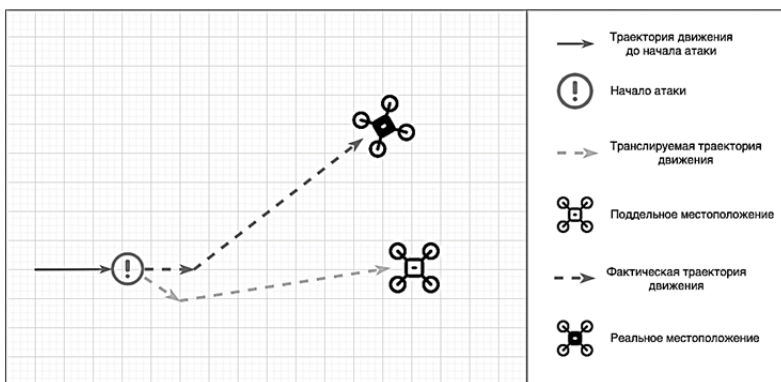


Рис. 2. Сценарий атаки на БПЛА, движущийся по заданной траектории

Рисунок 2 показывает желаемую траекторию движения БПЛА, которая отображена верхней, более темной линией, и ту траекторию, по которой будет двигаться БПЛА после проведения атаки злоумышленником (пунктирная нижняя линия). Восклицательным знаком обозначен момент начала атаки. В процессе проведения эксперимента БПЛА изменял свою траекторию движения и отклонился от той, что была задана его автопилоту.

В процессе испытаний при нормальных условиях полета оператором задавалось полетное задание для БПЛА и аппарат выполнял его на протяжении 10 минут.

В процессе испытаний атака на БПЛА осуществлялась после 3-5 минут полета и проводилась 10 минут. Во время атаки злоумышленник задавал поддельное местоположение БПЛА. В процессе экспериментов наблюдалось изменение высоты БПЛА, а также плавное смещение БПЛА в ложную точку. В ряде экспериментов, когда атака резко прерывалась, наблюдалось падение БПЛА.

**4. Алгоритм обнаружения атаки на систему GPS БПЛА.** Для обнаружения атаки предлагается учитывать следующие кибер-физические параметры:

- загруженность центрального процессорного устройства (ЦПУ),
- высота полета БПЛА ( $h_a$ ),
- состояние фиксации по спутникам ( $G_n$ ),
- неопределенность GPS ( $G_u$ ),
- шум GPS ( $G_{noi}$ ).

С учетом этих параметров алгоритм обнаружения аномалий предлагается представить в виде следующих шагов:

1. Фиксация «сырых» значений анализируемых кибер-физических параметров на протяжении определенного промежутка времени.

2. Построение подходящего типа распределения для собранных кибер-физических параметров (в данном случае распределение Пуассона).

3. С использованием скользящего окна осуществить выборку предыдущих значений и дополнить их собранными в новый момент времени, построить временной ряд значений.

4. Построение нового распределения для новых значений по тому же закону распределения.

5. Вычисление значения дивергенции Кульбака-Лейблера [18] для двух соседних функций распределения.

6. Чем выше полученное значение дивергенции Кульбака-Лейблера, тем больше вероятность, что на систему оказано влияние в виде атаки или внешнего деструктивного воздействия. Как правило такое значение должно превышать или быть равным 2 (было установлено авторами ранее экспериментальным путем) [19].

7. Повторить алгоритм для последующих новых значений кибер-физических параметров, начиная с пункта 3 (сдвиг окна).

Далее, были проведены вычисления энтропии для собранных значений кибер-физических параметров и оценка эффективности метода.



Установлено, что чем выше значение энтропии, тем больше вероятность, что изменение кибер-физического параметра говорит о наличии аномального поведения. Аномальное поведение может возникать не только из-за атаки, но также из-за воздействия со стороны окружающей среды

Так, например, скорость двигателей и высота полета могут быть не связаны с атакой, а могут изменяться из-за порывов ветра. Для однозначного определения атаки необходимо анализировать сразу несколько кибер-физических параметров и определять степень их отклонения [20].

### 5. Анализ результатов экспериментального исследования.

Рассмотрим, как изменялась высота полета без атаки и во время атаки. На рисунке 3(а) показан результат представления сырых данных об изменении высоты полета без атаки и на рисунке 3(б) показан результат представления сырых данных об изменении высоты полета во время проведения атаки.

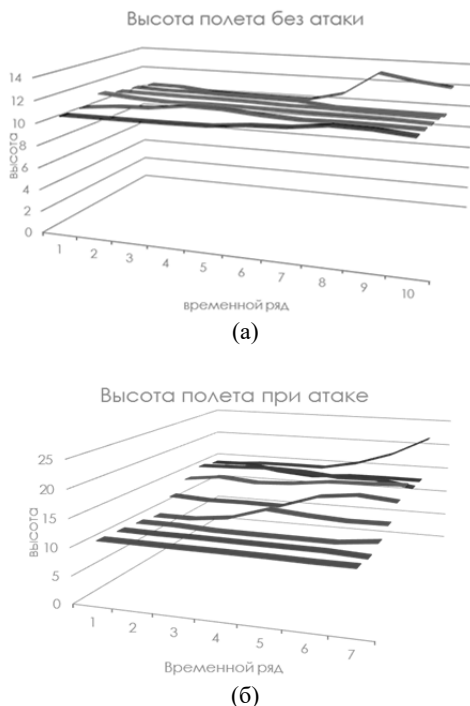


Рис. 3. Результат изменения высоты полета (а) без атаки (б) при атаке.

Из рисунка 3(а) видно, что несмотря на то, что атака не проводилась, небольшие изменения параметра всё же наблюдались. Такие изменения не фиксируются разработанным методом, как аномальные. Временные ряды позволяют сохранить информацию о возникшей аномалии и отражают ее на нескольких временных рядах, что возможно благодаря концепции скользящего окна. Из рисунка 3 (б) видно, что изменение вида временного ряда, наблюдаемое однажды, переносится на последующие временные ряды.

На рисунке 4 представлен результат вычисления дивергенции Кульбака-Лейблера для детектирования изменения высоты полета при атаке.

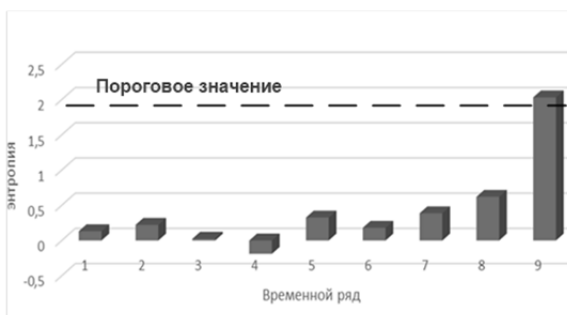
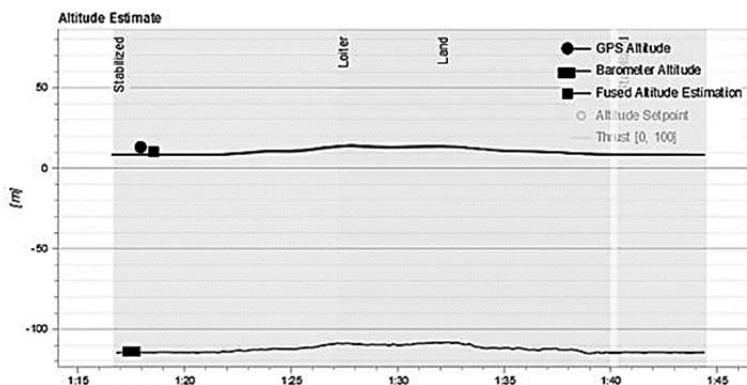


Рис. 4. Результат вычисления энтропии для высоты полета при атаке

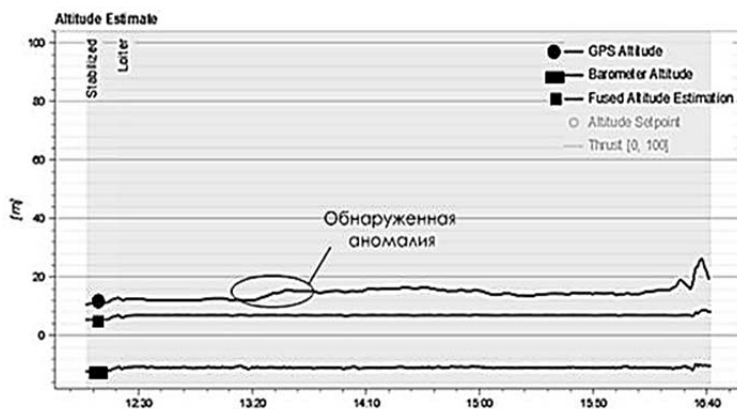
Из рисунка 4 видим, что наблюдается превышение показателя дивергенции Кульбака-Лейблера в последнем временном ряду. Так как атака на БПЛА начиналась с задержкой, то первые несколько значений являются достаточно низкими, затем наблюдается скачок на последних трех значениях. Это связано в первую очередь с тем, что БПЛА в результате атаки могут потерпеть крушение. В результате атаки БПЛА начал резко снижаться, но благодаря вмешательству оператора крушение было предотвращено. Напомним, что снижение высоты полета лишь косвенно может подтвердить атаку.

Из графиков на рисунке 5 видно, что данные, полученные из лог-файлов результатов испытаний БПЛА во время нормального полета и атаки, показывают наличие аномалии. На рисунке 5(а) показания инерциальной системы и GPS для измерения высоты полета совпадают, отличаются только показания барометра (самая нижняя линия на графике). Показания барометра во всех экспериментах отличаются от показаний акселерометра и системы навигации GPS. Это связано с неполадкой оборудования, поэтому в данном исследовании они не рассматриваются. Существенные изменения

высоты полета наблюдались в конце реализации сценария, что видно из графика 5(б). При нормальном поведении также наблюдалось небольшое изменение высоты. Отличие составляет также то, что при нормальном полете высота по показаниям инерциальной системы навигации и системы GPS изменялась одинаково. При атаке результат вычисления высоты полета, полученный от инерциальной системы и системы GPS, отличается, как видно из рисунка 5(б). Верхняя линия обозначает значение высоты полета, полученное от системы GPS, средняя линия - от акселерометра, а нижняя линия - от барометра. Барометр дает погрешность и при нормальном полете, а GPS и акселерометр должны совпадать в своих показаниях, как на рисунке 5(а).



(а)



(б)

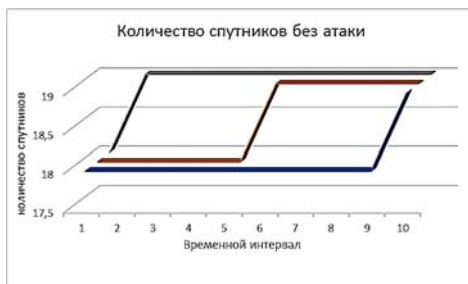
Рис.5. График высоты БПЛА (а) при нормальном полете (б) при атаке

Из рисунка 5 (б) видно, что изменение высоты полета наблюдалось дважды - ближе к началу (обозначено на рисунке, как обнаруженная аномалия) и в конце графика. В целом график выглядит менее гладким, чем рисунок 5 (а), где представлен график изменения высоты для нормального полета.

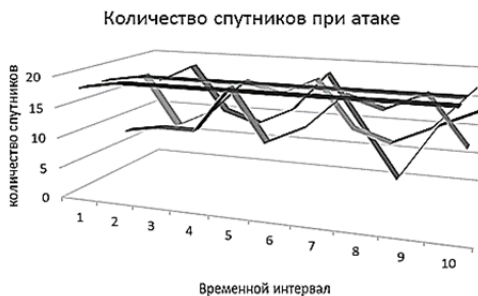
Проведённые эксперименты показывают, что аномалия, возникающая при атаке на подсистему GPS-навигации, успешно обнаруживается с помощью представленного метода.

Рассмотрим изменение другого кибер-физического параметра - количество спутников GPS. На рисунке 6(а) показан результат представления данных о количестве спутников без атаки и на рисунке 6(б) - при атаке.

Из рисунков видно, что изменения наблюдаются для обоих случаев, но для случая атаки колебания сильнее. Из рисунка 6(а) видно, как однажды возникшая аномалия переносится на все остальные временные ряды. Тем не менее, единичное повышение значения является случайным и незначительным, так как не влияет на процесс полета БПЛА. Как видно из рисунка 6(б), наблюдаются значительные изменения временных рядов.



(а)

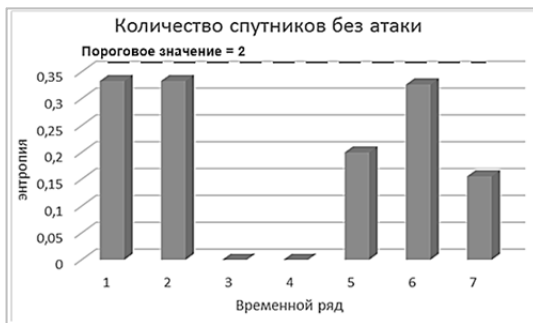


(б)

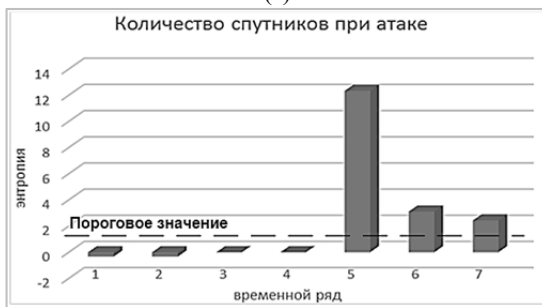
Рис. 6. Результат изменения количества спутников (а) без атаки, (б) при атаке

Теперь рассмотрим значение энтропии, которые получились в результате вычисления дивергенции Кульбака-Лейблера для данного параметра.

На рисунке 7(а) представлен результат вычисления дивергенции без атаки, а на рисунке 7(б) - при атаке. Из рисунка 7 видно, что на пятом интервале обнаруживается резкое превышение исходного уровня. В общем случае это не означает, что число спутников увеличилось (оно могло и уменьшиться), главное, что вид распределения между 3 и 4 интервалами не совпадает, а значит произошли существенные изменения. В случае с количеством спутников, их число должно быть примерно одинаковым. Таким образом, становится важно фиксировать именно резкие изменения, а не пороговые значения, так как злоумышленник может действовать по-разному. Он может создавать больше логичных спутников, если располагает достаточными мощностями, а может, наоборот, делать меньшее количество этих спутников, чем первоначально зафиксировал БПЛА.



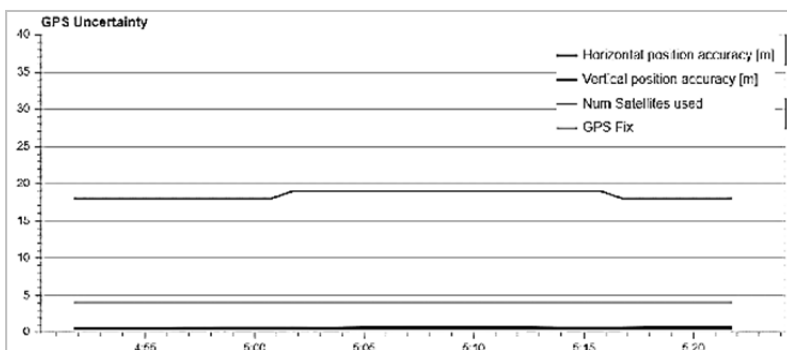
(а)



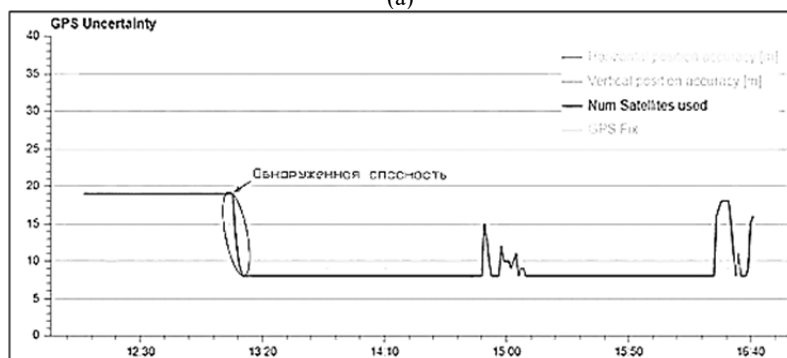
(б)

Рис. 7 – Результат вычисления энтропии для количества спутников (а) без атаки (б) при атаке

Для подтверждения эффективности методики рассмотрим результаты анализа лог-файлов, «сырых» данных, полученных в необработанном виде от БПЛА. Из рисунка 8(а) видно, что при нормальном полете число спутников менялось, но эти изменения были плавными и незначительными. При атаке изменение было резким, и при дальнейшем полете возникали колебания (рисунок 8(б)). Данные колебания могут быть связаны с отдалением или приближением БПЛА к устройству помех злоумышленника. Тем не менее, важно отметить, что метод позволяет зафиксировать аномалию. Эффективность работы метода основана на возможности оценки характера изменений киберфизического параметра, при которой нет необходимости обладать информацией о нормальных значениях.



(a)



(б)

Рис.8. Количество используемых GPS спутников (а) при нормальном полете (б) при атаке на GPS систему БПЛА

Сравним результаты поиска аномалий при анализе уровня шума во время атаки и без нее, как показано на рисунке 9.

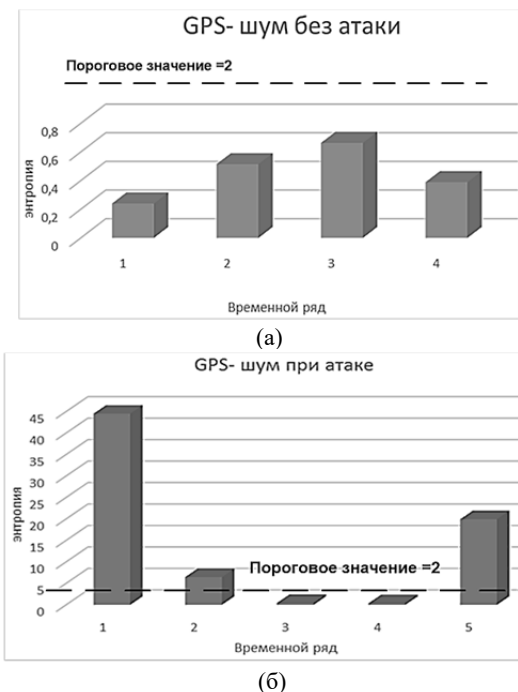


Рис. 9. Оценка энтропии кибер-физического параметра уровень шума GPS (а) в нормальных условиях (б) при атаке

Как видно из рисунка 9 (б), аномальное поведение обнаруживается с первого же значения рассчитанной дивергенции. Это связано с тем, что значение количества спутников изменилось достаточно резко и достаточно быстро, как видно на рисунке 8 (б). Таким образом обнаружение аномалии происходит после сравнения первых двух временных рядов. Ближе к концу опять наблюдаются скачки значений числа спутников и тем самым происходит повторное обнаружение аномалии во втором временном ряду и в пятом, что коррелирует с рисунком 8 (б).

**6. Заключение.** Несмотря на то, что опубликовано достаточно большое число работ с результатами исследований методов противодействия атакам спуфинга навигационной системы БПЛА, эта тема все еще актуальна [21-23]. На сегодняшний день

продемонстрирован ряд успешных атак на систему навигации БПЛА. Описанный в данной статье метод имеет ряд преимуществ по сравнению с известными подходами.

Метод может применяться для любых подсистем БПЛА, с которых можно снимать числовые показания. Главной задачей становится определение правильного типа распределения вероятностей для анализируемых параметров.

Метод вычислительно «легкий» и энергоэффективный. Программная реализация метода слабо влияет на загрузку процессора и энергопотребление БПЛА.

Поскольку метод позволяет анализировать любые параметры и может работать с любыми доступными данными, то не имеет значения, какими датчиками оснащен БПЛА.

С помощью разработанного метода можно не только обнаруживать аномалии, но и определять изменение закономерностей поведения БПЛА, изменение его состояний. Если значения определяемой энтропии не слишком высоки, и имеет место однократное увеличение, то это может указывать на изменение режима полета. Соотношение анализируемых параметров позволяет однозначно выявить атаку и определить ее тип. Каждая атака затрагивает определенный набор подсистем, поэтому тип атаки можно охарактеризовать по результирующим параметрам, на которые она влияет. Данные, собранные в виде временных рядов, могут быть использованы для обучения нейронных сетей принимать решения о проведении атаки. Метод может использоваться для анализа других наборов параметров и применяться не только к БПЛА, но и к любой киберфизической системе.

Дальнейшие исследования планируются в направлении разработки средств автоматизации и управления сценариями атак на БПЛА для упрощения и ускорения проведения экспериментов. Предусматривается продолжение работ по анализу влияния различных типов атак на киберфизические параметры БПЛА.

### **Литература**

1. Semajski S., Semajski I., Wilde W.D., Gautama S. Use of supervised machine learning for GNSS signal spoofing detection with validation on real-world meaconing and spoofing data—Part II. *Sensors*. 2020. № 20(7):1806. pp. 1-15.
2. Kwon K.-C., Shim D.-S. Performance analysis of direct GPS spoofing detection method with HRS/Accelerometer. *Sensors*. 2020. № 20(4): 954.
3. Wan W., Kim H., Hovakimyan N., Sha L., Voulgaris P.G. A Safety Constrained Control Framework for UAVs in GPS Denied Environment. 59-th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Korea (South). 2020. pp. 214-219.



4. Seo S.-H., Lee B.-H., Im S.-H., Jee G. Effect of spoofing on unmanned aerial vehicle using counterfeited GPS signal. *Journal of Positioning Navigation and Timing*. 2015. № 6. pp. 57-65.
5. Shepard D., Humphreys T., Fansler A. Evaluation of the vulnerability of phasor measurement units to GPS spoofing attacks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2012. № 5(3-4). pp. 146-153.
6. Jansen K., Schäfer M., Moser D., Lenders C., Pöpper C., Schmitt J. Crowd-GPS-sec: Leveraging crowdsourcing to detect and localize GPS spoofing attacks. *Proc. IEEE Symp. Security Privacy (SP)*. San Francisco, CA, USA: IEEE. 2018. pp. 1018-1031.
7. Montgomery P.Y., Humphreys T.E., Ledvina B.M. Receiver-autonomous spoofing detection: Experimental results of a multi-antenna receiver defense against a portable civil GPS spoofer. *Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. Anaheim, CA. 2009. pp. 124-130.
8. Jansen K., Tippenhauer O., Pöpper C. Multi-receiver GPS spoofing detection: Error models and realization. *Proceedings of the 32nd Annual Conference on Computer Security Application*. New York, United States: Association for Computing Machinery. 2016. pp. 237-250.
9. Heng L., Work D.B., Gao G.X. GPS signal authentication from cooperative peers. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2015. vol. 16. № 4. pp. 1794-1805.
10. G. Panice et al. A SVM-based detection approach for GPS spoofing attacks to UAV. *23-rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Huddersfield. 2017. pp. 1-11.
11. Eldosouky A., Ferdowsi A., Saad W. Drones in Distress: A Game-Theoretic Countermeasure for Protecting UAVs Against GPS Spoofing. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. vol. 7. № 4. pp. 2840-2854.
12. Qiao Y., Zhang Y., Du X. A Vision-Based GPS-Spoofing Detection Method for Small UAVs. *13-th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*. Hong Kong. 2017. pp. 312-316.
13. Choudhary G., Sharma V., You L., Yim K., Chen I.-R., Cho J.-H. Intrusion Detection Systems for Networked Unmanned Aerial Vehicles: A Survey. *14-th IEEE International Wireless Communications & Mobile Computing Conference*. Limassol, Cyprus. 2018. pp. 560-565.
14. Bekmezci I., Senturk E., Turker T. Security issues in Flying Adhoc Networks (FANETs). *Journal of Aeronautics and Space Technologies*. 2016. vol. 9. № 2. pp. 13-21.
15. Li C., Wang X. Jamming research of the UAV GPS/INS integrated navigation system based on trajectory cheating. *9-th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering, and Informatics (CISP-BMEI)*. 2016. Datong. pp. 1113-1117.
16. Schmidt D., Radke K., Camtepe S., Foo E., Ren M. A survey and analysis of the GNSS spoofing threat and countermeasures. *ACM Comput. Surveys (CSUR)*. 2016. vol. 48. № 4. pp. 64-69.
17. Joshi D. Commercial Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Analysis – Industry Trends Companies and What You Should Know. *Business Insider*. 2017.
18. Afgani M., Sinanovic S., Haas H. Anomaly detection using the Kullback-Leibler divergence metric. *First International Symposium on Applied Sciences on Biomedical and Communication Technologies*. 2008. Aalborg. pp. 1-5.
19. Basan, E., Basan, A., Nekrasov, A., Gamec, J., Gamcová, M. A self-diagnosis method for detecting UAV cyber attacks based on analysis of parameter changes. *Switzerland*. 2021. № 21(2). pp. 1–17.
20. E. Basan, A. Basan, A. Nekrasov. Method for detecting abnormal activity in a group of mobile robots. *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 18:4007. pp. 1-21.

21. В.Н. Максименко, Д.А. Ухин. [Анализ уязвимостей каналов связи спутниковых навигационных систем LBS-услуги]. Экономика и качество систем связи. 2019. №1. С. 18–22. <http://nirit.org/wp-content/uploads/2019/06/18-22.pdf>
22. L.A. Dobryakova, Ł.S. Lemieszewski., E.F. Ochin. [Атаки на глобальные навигационные спутниковые системы и обнаружение спуфинга беспилотных кораблей, базирующиеся на облачных технологиях]. Ural radio engineering journal. 2018. Vol.2 № 2. DOI: <https://doi.org/10.15826/urej.2018.2.2.003>
23. Котенко И. В., Саенко И. Б. Архитектура системы интеллектуальных сервисов защиты информации в критически важных инфраструктурах // Труды СПИИРАН. 2013. № 1 (24). С. 21–40.

**Басан Елена Сергеевна** — канд. техн. наук, доцент, кафедра безопасности информационных технологий, Южный федеральный университет. Область научных интересов: разработка и исследование технологий обнаружения атак и вторжений, обнаружение аномального поведения, безопасность робототехнических систем, анализ угроз и уязвимостей. Число научных публикаций — 55. [ebasan@sfnedu.ru](mailto:ebasan@sfnedu.ru); Чехова, 2, 347922, Таганрог, Россия; р.т.: +7(951)520-54-88.

**Абрамов Евгений Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра безопасности информационных технологий, Южный федеральный университет. Область научных интересов: технологии обнаружения сетевых атак, модели атак, технологии threat intelligence, применение методов искусственного интеллекта в информационной безопасности. Число научных публикаций — 80. [abramoves@sfnedu.ru](mailto:abramoves@sfnedu.ru); Чехова, 2, 347922, Таганрог, Россия; р.т.: +7(863)37-19-05.

**Басюк Анатолий Геннадьевич** — аспирант, кафедра безопасности информационных технологий, Южный федеральный университет. Область научных интересов: анализ угроз и уязвимостей программного обеспечения, разработка кибербезопасности БПЛА. Число научных публикаций — 3. [basyuk@sfnedu.ru](mailto:basyuk@sfnedu.ru); Чехова, 2, 347922, Таганрог, Россия; р.т.: +7(863)37-19-05.

**Сушкин Никита Андреевич** — аспирант, кафедра безопасности информационных технологий, Южный федеральный университет. Область научных интересов: разработка и исследование сценариев атак на БПЛА, разработка систем кибербезопасности БПЛА. Число научных публикаций — 2. [sushkin@sfnedu.ru](mailto:sushkin@sfnedu.ru); Чехова, 2, 347922, Таганрог, Россия; р.т.: +7(863)37-19-05.

E. BASAN, E. ABRAMOV, A. BASYUK, N. SUSHKIN  
**SPOOFING ATTACK DETECTION METHOD FOR UAV  
NAVIGATION SYSTEM**

*Basan E., Abramov E., Basyuk A., Sushkin N. Spoofing Attack Detection Method for UAV Navigation System.*

**Abstract.** An implementation of methods for protecting unmanned aerial vehicles (UAVs) from spoofing attacks of the global positioning system (GPS) to ensure safe navigation is discussed in this paper. The Global Navigation Satellite System (GNSS) is widely used to locate UAVs and is by far the most popular navigation solution. This is due to the simplicity and relatively low cost of this technology, as well as the accuracy of the transmitted coordinates. However, there are many security threats to GPS navigation. Primarily this is due to the nature of the GPS signal, the signal is transmitted in the clear, so an attacker can block or tamper with it. This study analyzes the existing GPS protection methods. As part of the study, an experimental stand and scenarios of attacks on the UAV GPS system were developed. Data from the UAV flight logbook was collected and an analysis of cyber-physical parameters was carried out to see an effect of the attack on the on-board sensors readings. Based on this, a new method for detecting UAV anomalies was proposed, based on an analysis of changes in UAV internal parameters. This self-diagnosis method allows the UAV to independently assess the presence of changes in its subsystems and identify signs of a cyberattack. To detect an attack, the UAV collects data on changes in cyber-physical parameters over a certain period of time, then updates this data. As a result it is necessary for the UAV to determine the degree of difference between the two time series of the collected data. The greater the degree of difference between the updated data and the previous ones, the more likely the UAV is under attack.

**Keywords:** security, attack, navigation system, UAV, threat, probability, protection technology, global navigation satellite system.

**Basan Elena** — Ph.D., Associate Professor, Department of secure information technologies, Southern Federal University. Research interests: development and research of attack and intrusion detection technologies, detection of abnormal behavior, security of robotic systems, threat and vulnerability analysis. The number of publications — 55. ebasan@sfedu.ru; 2, Chekhova, 347922, Taganrog, Russia; office phone: +7(951)520-54-88.

**Abramov Eugene** — Ph.D., Associate Professor, Head of the department, Department of Secure Information Technologies, Southern Federal University. Research interests: technology for the detection of network attacks, attack models, threat intelligence technology, the use of artificial intelligence methods in information security. The number of publications — 80. abramoves@sfedu.ru; 2, Chekhova, 347922, Taganrog, Russia; office phone: +7(863)37-19-05.

**Basyuk Anatoly** — Postgraduate student, Department of Secure Information Technologies, Southern Federal University. Research interests: analysis of threats and vulnerabilities of software, development of UAV cybersecurity models. The number of publications — 3. basyuk@sfedu.ru; 2, Chekhova, 347922, Taganrog, Russia; office phone: +7(863)37-19-05.

**Sushkin Nikita** — Postgraduate student, Department of Secure Information Technologies, Southern Federal University. Research interests: development and research of UAV attack

scenarios, development of UAV cybersecurity systems. The number of publications — 2. sushkin@sfedu.ru; 2, Chekhova, 347922, Taganrog, Russia; office phone: +7(863)37-19-05.

## References

1. Semanjski S., Semanjski I., Wilde W.D., Gautama S. Use of supervised machine learning for GNSS signal spoofing detection with validation on real-world meaconing and spoofing data—Part II. *Sensors*. 2020. № 20(7):1806. pp. 1-15.
2. Kwon K.-C., Shim D.-S. Performance analysis of direct GPS spoofing detection method with AHRS/Accelerometer. *Sensors*. 2020. № 20(4):954.
3. Wan W., Kim H., Hovakimyan N., Sha L., Voulgaris P.G. A Safety Constrained Control Framework for UAVs in GPS Denied Environment. 59-th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Korea (South). 2020. pp. 214-219.
4. Seo S.-H., Lee B.-H., Im S.-H., Jee G. Effect of spoofing on unmanned aerial vehicle using counterfeited GPS signal. *Journal of Positioning Navigation and Timing*. 2015. № 6. pp. 57-65.
5. Shepard D., Humphreys T., Fansler A. Evaluation of the vulnerability of phasor measurement units to GPS spoofing attacks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2012. № 5(3-4). pp. 146-153
6. Jansen K., Schäfer M., Moser D., Lenders V., Pöpper C., Schmitt J. Crowd-GPS-sec: Leveraging crowdsourcing to detect and localize GPS spoofing attacks. *Proc. IEEE Symp. Security Privacy (SP)*. San Francisco, CA, USA: IEEE. 2018. pp. 1018-1031.
7. Montgomery P.Y., Humphreys T.E., Ledvina B.M. Receiver-autonomous spoofing detection: Experimental results of a multi-antenna receiver defense against a portable civil GPS spoofer. *Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. Anaheim, CA. 2009. pp. 124-130.
8. Jansen K., Tippenhauer O., Pöpper C. Multi-receiver GPS spoofing detection: Error models and realization. *Proceedings of the 32nd Annual Conference on Computer Security Application*. New York, United States: Association for Computing Machinery. 2016. pp. 237-250.
9. Heng L., Work D.B., Gao G.X. GPS signal authentication from cooperative peers. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2015. vol. 16. № 4. pp. 1794-1805.
10. G. Panice et al. A SVM-based detection approach for GPS spoofing attacks to UAV. 23-rd International Conference on Automation and Computing (ICAC). Huddersfield. 2017. pp. 1-11.
11. Eldosouky A., Ferdowsi A., Saad W. Drones in Distress: A Game-Theoretic Countermeasure for Protecting UAVs Against GPS Spoofing. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. vol. 7. № 4. pp. 2840-2854.
12. Qiao Y., Zhang Y., Du X. A Vision-Based GPS-Spoofing Detection Method for Small UAVs. 13-th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS). Hong Kong. 2017. pp. 312-316.
13. Choudhary G., Sharma V., You L., Yim K., Chen I.-R., Cho J.-H. Intrusion Detection Systems for Networked Unmanned Aerial Vehicles: A Survey. 14-th IEEE International Wireless Communications & Mobile Computing Conference. Limassol, Cyprus. 2018. pp. 560-565.
14. Bekmezci I., Senturk E., Turker T. Security issues in Flying Adhoc Networks (FANETs). *Journal of Aeronautics and Space Technologies*. 2016. vol. 9. № 2. pp. 13-21.
15. Li C., Wang X. Jamming research of the UAV GPS/INS integrated navigation system based on trajectory cheating. 9-th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering, and Informatics (CISP-BMEI). 2016. Datong. pp. 1113-1117.

16. Schmidt D., Radke K., Camtepe S., Foo E., Ren M. A survey and analysis of the GNSS spoofing threat and countermeasures. *ACM Comput. Surveys (CSUR)*. 2016. vol. 48. № 4. pp. 64-69.
17. Joshi D. *Commercial Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Analysis – Industry Trends Companies and What You Should Know*. Business Insider. 2017.
18. Afgani M., Sinanovic S., Haas H. Anomaly detection using the Kullback-Leibler divergence metric. *First International Symposium on Applied Sciences on Biomedical and Communication Technologies*. 2008. Aalborg. pp. 1-5.
19. Basan, E., Basan, A., Nekrasov, A., Gamec, J., Gamcová, M. A self-diagnosis method for detecting UAV cyber attacks based on analysis of parameter changes. *Switzerland*. 2021. № 21(2). pp. 1–17.
20. E. Basan, A. Basan, A. Nekrasov. Method for detecting abnormal activity in a group of mobile robots. *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 18:4007. pp. 1-21.
21. V.N. Maksimenko, D.A. Uhin. [Analiz uyazvimostej kanalov svyazi sputnikovyh navigacionnyh sistem LBS-uslugi]. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*. 2019. №1. S. 18–22. <http://nirit.org/wp-content/uploads/2019/06/18-22.pdf>
22. L.A. Dobryakova, L.S. Lemieszewski., E.F. Ochin. [Ataki na global'nye navigacionnye sputnikovye sistemy i obnaruzhenie spufinga bespilotnyh korablej, baziruyushcheesya na oblachnyh tekhnologiyah]. *Ural radio engineering journal*. 2018. Vol.2 № 2. DOI: <https://doi.org/10.15826/urej.2018.2.2.003>
23. Kotenko I. V., Saenko I. B. Arhitektura sistemy intellektual'nyh servisov zashchity informacii v kriticheski vazhnyh infrastrukturah // *Trudy SPIIRAN*. 2013. № 1 (24). S. 21–40.

**Н.Н. СЕВОСТЬЯНОВА, И.В. ЛЕБЕДЕВ, В.В. ЛЕБЕДЕВА, И.В. ВАТАМАНЮК  
ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
ФОТОАКТИВАЦИИ ПОСЕВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ  
ПОСРЕДСТВОМ БПЛА С ЦЕЛЬЮ СТИМУЛЯЦИИ РОСТА  
КУЛЬТУР**

*Севостьянова Н.Н., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Ватаманюк И.В. Инновационный подход к автоматизированной фотоактивации посевных площадей посредством БПЛА с целью стимуляции роста культур.*

**Аннотация.** Фотоактивация растений посредством лазерной обработки является перспективным направлением развития современного аграрного производства. Обработка растений излучением с заданными характеристиками стимулирует развитие растений, формирование генеративных признаков и рост урожайности. Для автоматизации процесса фотоактивации больших посевных площадей предложен подход, основанный на использовании специализированной лазерной установки, монтируемой на беспилотный летательный аппарат (БПЛА). При помощи БПЛА можно производить лазерную обработку сельскохозяйственных полей большой площади при минимальных затратах временных и человеческих ресурсов. В работе предложен алгоритм расчета траектории для равномерного покрытия прямоугольного участка земли лазерным излучением с заданными характеристиками. Приводится методика расчета требуемой мощности лазерной установки в зависимости от высоты и времени полета БПЛА. Преимуществом разработанного подхода является его универсальность, поскольку данный подход учитывает характеристики лазерного устройства и может применяться с устройствами различного типа. В зависимости от параметров лазера алгоритм строит такую траекторию для БПЛА, чтобы облучение всходов растений было равномерным на протяжении всего процесса обработки. При проведении полевых экспериментов при движении БПЛА вдоль рассчитанной траектории со скоростью 0,3 м/с время обработки поля длиной в 200 м и шириной 1 м составило 9 мин. Результаты полевых экспериментов показывают, что лазерное облучение для большей части изучаемых культур увеличило урожайность и высоту травостоя (у злаковых – для четырех из шести культур, у бобовых – для четырех из пяти изучаемых культур). Предлагаемый алгоритм построения пути для равномерного лазерного облучения участка учитывает площадь проекции лазерного излучения для обеспечения требуемых характеристик обработки поля.

**Ключевые слова:** лазерная установка, стимуляция роста растений, БПЛА, сельское хозяйство, планирование пути, планирование покрывающей траектории, маломощный лазер, лазерная фотоактивация.

**1. Введение.** Разработка и использование новых методов эффективного стимулирования развития растений является актуальной задачей современного растениеводства [1]. Многие исследователи изучают воздействие электромагнитного поля и УФ-излучения на семена культурных растений [2, 3]. Облучение семян растений часто приводит к росту посевных качеств, таких как всхожесть и энергия прорастания, а также к улучшению морфологических параметров растения, что ведет к росту урожайности [4].

Среди энергетических воздействий высокой экономичностью, технологичностью и экологической безопасностью обладает лазерное излучение [5]. Лазерная фотоактивация (обработка) сельскохозяйственных культур – это непрерывное или импульсивное облучение семян или их всходов лучом лазера. Основной целью такой обработки является повышение урожайности, снижение заболеваемости растений различными инфекциями, развитие мощной корневой системы у с/х культур. В результате лазерной обработки увеличивается всхожесть семян, активируется синтез хлорофилла, за счёт чего растения быстрее развиваются и дают высокий урожай.

Преимущества лазерной обработки: кратковременность воздействия, отсутствие отрицательных эффектов в широком диапазоне режимов лазерной обработки семян; стабильное повышение урожайности с/х культур в различных почвенно-климатических условиях; повышение качества с/х продукции (увеличение количества белков, углеводов и витаминов); возможность снижения нормы высева на 10-30% за счет повышения полевой всхожести семян и усиления ростовых процессов; повышение устойчивости растений к поражению различными заболеваниями; безвредность обработки для растений [6].

На практике часто применяется именно лазерная фотоактивация семян. Например, способ, описанный в работе [7], может быть использован для предпосевной обработки семян. Способ включает операцию предпосевного облучения семян в условиях зернохранилищ лазерным лучом, сканирующим одновременно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В работах [8-10] описано влияние низкоинтенсивного лазерного излучения с длиной волны 635, 650 и 890 нм (в работе [8] – 890 нм, в [9] – 650 нм, в [10] – 635 нм) на семена с/х культур, с целью активации всхожести. По результатам экспериментов после лазерного облучения всхожесть опытных семян болгарского перца и огурца [8], семейства тыквенных [9] и бобовых [10] оказалась почти на 21% выше, чем всхожесть контрольных групп, которые не подвергались облучению.

В последние годы также стала популярна лазерная обработка всходов. Практические результаты, полученные таким методом обработки ростков, выглядят многообещающе [11]. Так, например, авторы работ [12-13] предлагают автоматическую систему обработки растений с использованием солнечной энергии в качестве источника питания. В качестве источников излучения в системе используется набор мало-мощных лазеров разного спектра. Луч каждого лазера разворачивается в линию с помощью элемента развертки, получаемая лазерная линия попадает на зеркало. Отражение лазерной линии попадает на растения.

Движение зеркала вокруг одной оси вызывает движение лазерной линии по растениям. Поворот зеркала осуществляется с помощью сервопривода, который позволяет точно управлять параметрами движения. Включение нужного лазера и управление сервоприводом осуществляется через блок управления. Однако такой способ лазерной обработки затруднительно использовать для облучения больших площадей открытого грунта.

Для лазерной обработки обширных посевных площадей применяются различные способы, суть которых заключается в использовании одного подвижного источника излучения, последовательно обрабатывающего небольшие участки поля. В качестве такого передвигающегося источника излучения может быть использован беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Данные аппараты все чаще используются в задачах роботизации сельского хозяйства, например, для мониторинга обширных территорий, точечного внесения удобрений, сбора урожая и др. [14, 15].

Стоит обратить внимание на работу [16], в которой представлен способ лазерной обработки растений посредством БПЛА с интегрированным подвесом блока лазерной кадровой развертки. В блоке формируется сканирующая кадровая развертка лазерного излучения в виде квадратной проекции лазерного излучения. Формируемый оптомеханическим блоком лазерной кадровой развертки кадр с размером  $350 \times 350$  м, при высоте полета БПЛА 10 м, позволяет обработать площадь 12 га за 30 с. Алгоритм обработки, предлагаемый в [16], выглядит следующим образом. На основании данных о местонахождении и конфигурации поля оператор с клавиатуры блока управления заносит в память БПЛА параметры полета: скорость полета, высоту и координаты точек взлета и посадки, которые лежат в пределах облучаемого участка. В память БПЛА также вводятся координаты привязки к местности для улучшенного позиционирования БПЛА и устанавливается размер окна излучения блока кадровой развертки под заданную площадь обработки. После входа в рабочую точку и набора нужной высоты БПЛА зависает в воздухе и в течение 30 секунд выполняет лазерную обработку. Выполнив обработку, система управления отключает лазер блока кадровой развертки и возвращает БПЛА в точку взлета. Недостатком предложенного способа является его достаточно узкая область применения из-за использования специфического оборудования. Угол веерного пучка лазерной установки составляет  $174^{\circ}$  и его невозможно изменить. Другими словами, решение в [16] предполагает использование лазерного модуля с фиксированными характеристиками.



Целью данной работы является решение задачи управления БпЛА для обеспечения лазерной обработки с заданными характеристиками прямоугольного участка с/х поля заданной площади. Стартовая и конечная координаты БпЛА совпадают и лежат за пределами области покрытия. Предполагается, что на обрабатываемом участке отсутствуют какие-либо препятствия.

Для достижения указанной цели работы необходима разработка алгоритма автоматизированного движения БпЛА, а также обеспечивающего равномерное облучение лазером заданной территории с сохранением требуемой мощности и других параметров излучения, обеспечивающих эффективный рост растений.

Работа структурирована следующим образом: раздел 1 содержит обзор и анализ современных подходов к планированию траектории для равномерного покрытия облучаемой области; раздел 2 содержит описание подхода к решению задачи покрытия проекцией лазерного луча с заданными характеристиками обширных прямоугольных областей без препятствий; в разделе 3 и 4 представлены результаты теоретических и практических экспериментов соответственно; в заключении представлены преимущества и недостатки предлагаемой схемы лазерной обработки с/х культур.

**2. Подходы к планированию траектории для покрытия облучаемой области.** Задача управления БпЛА, которую необходимо решить для обеспечения равномерного лазерного облучения ростков, сводится к задаче планирования маршрута равномерного покрытия обрабатываемой области (Coverage Path Planning task, CPP). Задача планирования пути покрытия классифицируется как подзадача планирования движения в робототехнике, где необходимо построить траекторию для робота, чтобы исследовать заданную область [17]. Воспользуемся классификацией существующих подходов к планированию траектории БпЛА для покрытия изучаемой области в соответствии с используемой техникой клеточной декомпозиции [17]. Согласно этой классификации, существуют подходы без декомпозиции и методы, использующие точную и приближенную клеточную декомпозицию. По условию поставленной задачи, область интереса для полёта представлена в виде прямоугольника или выпуклого многоугольника, не имеющего запрещенных для полета зон и препятствий. Для решения такого класса задач используются подходы без декомпозиции рабочей области. Миссии, выполняемые на областях правильной формы с помощью одного БпЛА, обычно не требуют дополнительного разложения на более мелкие области. Для исследования таких участков достаточно простых геометрических паттернов движения. Наиболее распро-

страненные паттерны – возвратно-поступательное движение (the back-and-forth) и спираль (the spiral). Первый вариант наиболее популярен при реализации упомянутых подходов к управлению полетом [18,19]. В этом варианте траектории состоят из прямых линий в обоих направлениях с маневрами под прямым углом в конце каждой прямой. Второй подход реализует траекторию, проходящую по внешним вершинам области и сходящуюся по спирали к центральной точке области исследования.

Одной из основных проблем, связанных с движением БПЛА, является ограниченный заряд аккумулятора и, как следствие, непродолжительное время полета. Во время маневров при повороте БПЛА должны замедляться, совершать поворот и снова ускоряться, увеличивая время полета и, следовательно, потребление энергии. Кроме того, существенное влияние на время полета оказывают погодные условия [20]. Согласно приведенным в работе [20] экспериментам, направление траектории покрытия должно быть перпендикулярно направлению ветра, чтобы минимизировать время полета.

Некоторые исследователи стремятся минимизировать расстояние, время полета или число маневров, чтобы снизить потребление энергии. Так, например, сглаживание маневров БПЛА при повороте способствует сохранению постоянной скорости и уменьшению энергозатрат. В последнее время были разработаны современные энергоэффективные алгоритмы возвратно-поступательного движения [21] и движения по спирали [22], которые в основном касаются оптимизации энергопотребления на прямых участках пути с учетом ограничений аккумуляторов БПЛА [23]. Согласно рассмотренным работам, основными критериями эффективности популярных алгоритмов СРР являются уменьшение времени полета и уменьшение потребления энергии БПЛА.

Далее описан предлагаемый подход к решению задачи покрытия проекцией лазерного излучения обширных прямоугольных областей без препятствий. Особенностью предлагаемого подхода является то, что он учитывает размер проекции лазерного луча при распределении путевых точек на заданной территории, что позволяет обеспечить равномерное покрытие обрабатываемого поля. Кроме того, предлагаемый подход можно использовать с любым лазерным устройством.

**3. Подход к решению задачи покрытия проекцией лазерного луча с заданными характеристиками обширных прямоугольных областей без препятствий.** В отличие от алгоритма лазерной обработки, предложенного в работе [16], мы предлагаем следующую последовательность действий для реализации процесса лазерной фотоактива-

ции посредством БПЛА. Заранее определяются размеры и координаты обрабатываемого участка поля. На основании этих данных оператор с клавиатуры наземного пункта управления задаёт координаты участка для облучения, скорость и высоту полёта. Модуль планирования пути, установленный на БПЛА, рассчитывает оптимальную траекторию, которая покрывает весь заданный участок. Точка взлёта может находиться на некотором расстоянии от обрабатываемого участка. После занесения всех входных данных для расчета траектории, оператор, через наземную станцию, отправляет на БПЛА команду о запуске полётного задания. Далее всё полетное задание выполняется без участия человека. После набора рабочей высоты БПЛА движется вдоль запланированной траектории. На борту БПЛА установлен RTK GPS – устройство, реализующее систему дифференциальной коррекции глобальных навигационных спутниковых систем и позволяющее существенно повысить точность позиционирования. Благодаря использованию датчика RTK GPS в составе аппаратного обеспечения БПЛА, отклонение от траектории движения не превышает 5–10 см. После завершения обработки заданного участка лазер отключается, а БПЛА возвращается в точку старта по рассчитанному наикратчайшему пути до неё и совершает автоматическую посадку. За счет наличия блока планировщика траектории, равномерно покрывающей участок облучения, на БПЛА можно использовать лазерную установку с разными оптическими характеристиками. Это обусловлено тем, что алгоритм планирования пути учитывает оптические характеристики (площадь проекции лазерного луча) лазерной установки при построении траектории.

Рассмотрим работу алгоритма планирования пути более подробно. Для расчета траектории движения БПЛА на участке облучения сперва необходимо рассчитать площадь проекции луча лазера на землю. Площадь проекции лазерного излучения напрямую зависит от угла веерного пучка лазерного модуля и высоты облучения. Произведем расчет площади проекции лазерного излучения и времени выполнения миссии.

Входными параметрами для расчета зависимости требуемых параметров лазерной установки от высоты полета БПЛА являются параметры обрабатываемого участка: длина  $l$  и ширина  $m$  поля, высота  $h$ , на которой происходит обработка поля и параметры лазерной установки – угол веерного пучка  $\beta$  и поверхностная плотность энергии излучения  $w$ .

Сперва необходимо рассчитать длину лазерной проекции  $ml$  на высоте  $h$  :

$$ml = 2 * h * tg\left(\frac{\beta}{2}\right).$$

Площадь лазерной проекции  $S$  , соответственно, будет равна:

$$S = (2 * h * tg\left(\frac{\beta}{2}\right))^2.$$

Рассчитаем требуемую мощность лазерного излучения  $P_l$  :

$$P_l = S * w.$$

Зная площадь лазерной проекции, можно рассчитать скорость БПЛА  $v$  , с которой будет происходить обработка поля:

$$v = \frac{\sqrt{S}}{T_1},$$

где  $T_1$  – единичное время излучения. На рисунке 1 приведено схематическое изображение рассчитываемых величин.

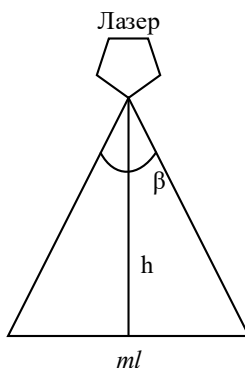


Рис.1. Схематическое изображение лазера и проекции лазерного излучения на поверхность

Для того чтобы правильно рассчитать время автономной работы БПЛА до окончания его энергетических запасов (разрешенное время

обработки  $T$ ), примем время  $t_{return}$ , как необходимое время для возврата БПЛА на стартовую позицию. Это обеспечит БПЛА возможностью вернуться на стартовую позицию из конечной точки покрывающей территории. Время  $t_{return}$  рассчитывается как сумма времени движения БПЛА от самого удаленного участка поля  $t_{diagonal}$  и фиксированное время для осуществления посадки  $t_{land}$ :

$$t_{return} = t_{diagonal} + t_{land},$$

где  $t_{diagonal}$  – время движения БПЛА вдоль диагонали облучаемого поля и рассчитывается как:

$$t_{diagonal} = \frac{\sqrt{m^2 + l^2}}{v_{cp}},$$

где  $v_{cp}$  – это средняя горизонтальная скорость движения БПЛА по прямой.

Произведем расчет общего времени обработки поля  $T_{общ}$ :

$$T_{общ} = N * t,$$

где  $N$  – количество аккумуляторов БПЛА, которое можно рассчитать по формуле  $N = \frac{\tau}{T}$ ,  $\tau$  – это предварительное время, рассчитанное по формуле:

$$\tau = \frac{S_n}{S} * T_1,$$

где  $S_n$  — это площадь обрабатываемого поля.

Произведем численный расчет параметров лазера по предложенным формулам. Имея следующие параметры поля:  $l = 200$  м,  $m = 30$  м,  $h = 10$  м,  $T_1 = 3$  с,  $t = 1080$  с (18 мин) и параметры лазерной установки:  $\beta = 6^\circ$  и  $w = 1$  Вт/м<sup>2</sup>, получим следующие характеристики обработки: необходимая мощность лазера  $P_l = 1,099$  Вт, а общее вре-

мя обработки поля  $T_{\text{общ}} = 20480$  с или 5,6 часов. Исходя из этих требований можно подобрать БПЛА, удовлетворяющий данным характеристикам или разбить задачу обработки целого поля на подзадачи обработки более мелких участков.

Для расчета покрывающей траектории полета БПЛА был разработан алгоритм, который рассчитывает траекторию СРР на основе возвратно-поступательного движения. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 2.

Траектория рассчитывается в двумерной плоскости, поскольку предполагается, что БПЛА совершает миссию на фиксированной высоте. На вход алгоритма подаются стартовая координата БПЛА (по условиям задачи стартовая и конечная координаты совпадают  $X_s Y_s = X_t Y_t$ ), координаты вершин облучаемого участка  $M = [X_1 Y_1; \dots; X_4 Y_4]$  и шаг покрытия  $L$  (ширина проекции лазерного луча). Далее вычисляется количество линий покрытия (количество отдельных прямолинейных участков траектории, необходимых для заполнения облучаемого участка с шагом  $L$ ):  $N_l = a / L(1-s)$ , где  $a$  – наименьшая сторона прямоугольника для оптимального направления покрытия [24],  $s \in (0,1)$  представляет собой долю перекрытия между двумя участками. Расстояние в метрах между двумя участками траектории равно:  $d_l = a / N_l$ .

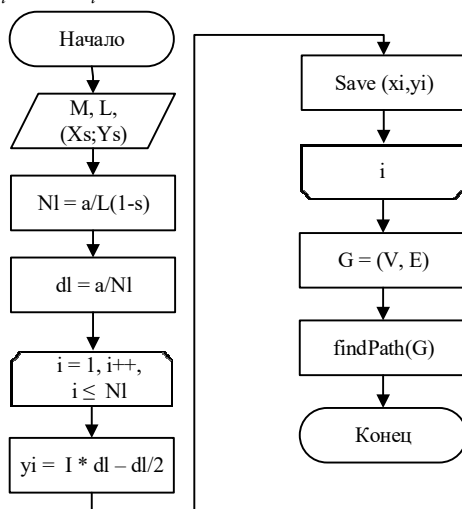
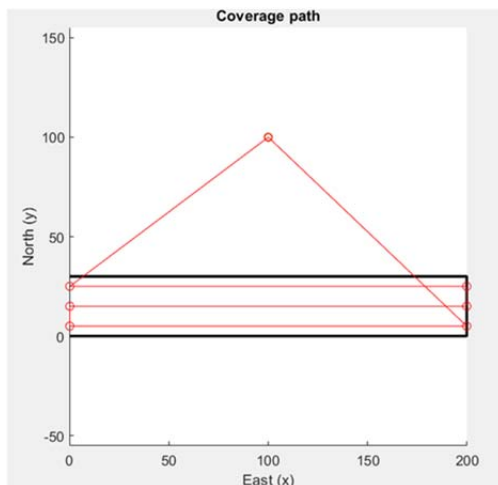


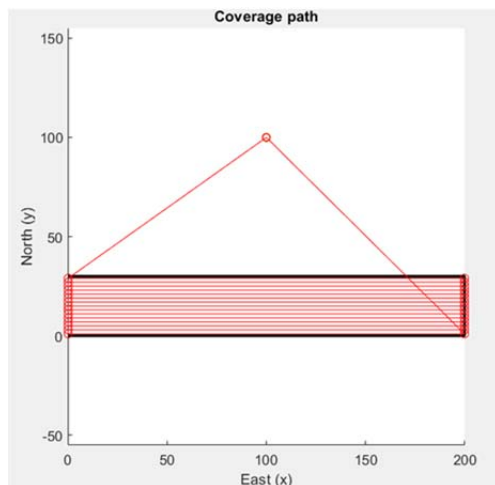
Рис. 2. Блок-схема разработанного алгоритма расчета покрывающей траектории

Предполагая, что прямоугольник, представляющий область облучения, повернут таким образом, что оптимальное направление покрытия параллельно оси  $Ox$  глобальной системы отсчета, линии покрытия могут быть определены двумя точками  $(x, y)$  с координатами  $y$ , заданными как:  $y_i = i \times d_l - 0.5d_l$ ,  $i = 1, \dots, N_l$ . А координаты  $x$  определяются точками, в которых горизонтальная прямая с координатой  $y_i$  пересекает границы области, которая должна быть покрыта. Крайние точки рядов покрытия вместе с координатами стартовой позиции БПЛА представляются набором узлов  $V$  графа  $G = (V, E)$ . Каждый узел графа пронумерован так, чтобы стартовая позиция получила номер 1, узлы, относящиеся к первому ряду покрытия, получили номера 2 и 3, те, что связаны со вторым рядом, помечены как 4 и 5 и так далее. В конце каждый участок траектории связывается с последующими четными и нечетными узлами. Набор ребер  $E$  состоит из всех линий, соединяющих  $N$  узлов графа, таким образом образуя полный граф.

Для того чтобы найти путь на этом графе для решения задачи СРР, воспользуемся методом на основе возвратно-поступательного движения, представленном в работе [25]. На выходе получим массив координат, который составляет траекторию, вдоль которой необходимо двигаться БПЛА для облучения участка. Результаты работы алгоритма расчета покрывающей траектории представлены на рисунке 3.



а)



б)

Рис. 3. Спланированные траектории для участка размером 200 на 30 м с шагом: а) 10 м, б) 2 м

На рисунке границы облучаемой области выделены черной линией. Красная линия – это рассчитанная покрывающая траектория. Ключевые точки, где БПЛА совершает поворот на  $90^\circ$ , выделены красным. Стартовая и конечная координаты совпадают и находятся в точке (100, 100). Время, затраченное на расчёт траекторий на участке 200 на 30 м, не превышает 0,05 с.

**4. Теоретические эксперименты.** В целях проверки работы предлагаемого алгоритма лазерной обработки растений было проведено 3 эксперимента. Первый эксперимент предполагает обработку поля размерами 100 на 100 м (1 га), второй – 500 на 500 м (25 га), третий – 1000 на 1000 м (100 га). Изменяемыми параметрами были: время расчёта покрывающей траектории, запланированное время полёта вдоль этой траектории, необходимое количество аккумуляторов для завершения одного цикла обработки и длина рассчитанного пути (время работы БПЛА от одного аккумулятора 1080 с). Для расчёта были взяты следующие данные: скорость БПЛА – 0,3 м/с, время облучения единичной площади проекции лазерного излучения  $T_1$  – 3 с, высота облучения – 10 м. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.



Таблица 1. Результаты теоретических экспериментов

Эксперимент №1				
Площадь проекции лазерного излучения, м <sup>2</sup>	Время расчета пути, с	Запланированное время полёта, чч:мм:сс	Запланированное время полёта, с	Количество аккумуляторов, шт
1	0,0263	13:40:22	49200	46
100	0,0055	1:30:22	5400	5
10000	0,004	0:13:08	780	1
122500	-	-	-	-
250000	-	-	-	-
Эксперимент №2				
Площадь проекции лазерного излучения, м <sup>2</sup>	Время расчета пути, с	Запланированное время полёта, чч:мм:сс	Запланированное время полёта, с	Количество аккумуляторов, шт (время работы одного аккумулятора 1080 с)
1	0,0561	9 дней 2:15:56	-	-
100	0,0478	22:27:03	80820	75
10000	0,0039	2:47:33	10020	9
122500	0,0043	1:20:23	4800	4
250000	0,003	0:54:35	3240	3
Эксперимент №3				
Площадь проекции лазерного излучения, м <sup>2</sup>	Время расчета пути, с	Запланированное время полёта, чч:мм:сс	Запланированное время полёта, с	Количество аккумуляторов, шт (время работы одного аккумулятора 1080 с)
1	0,1566	29 суток	-	-
100	0,0192	3 дня 15:52:48	-	-
10000	0,0085	10:09:59	36540	34
122500	0,0073	2:48:43	10080	9
250000	0,0074	1:49:53	6540	6

Все вычисления проводились на вычислительной машине с процессором Intel Core i7 2,4 ГГц и 16 ГБ оперативной памяти. Как показано в таблице, время расчета покрывающей траектории для всех экспериментов не превышает 1 с. Оптимальное значение площади проекции лазерного излучения для предлагаемого в работе алгоритма обработки растений – 10000 м (1 га). Для обработки обширных территорий за меньшее время необходимо увеличивать площадь проекции

лазерного излучения. Это можно сделать двумя способами: увеличить угол веерного пучка или увеличить высоту, на которой происходит обработка растений. Однако в таком случае необходимо произвести перерасчет мощности лазерной установки и времени облучения единичной площади для сохранения характеристик облучения.

**5. Практические эксперименты.** Для проведения полевых экспериментов была разработана специальная установка для лазерной обработки растений на с/х территориях. Внешний вид установки представлен на рисунке 4.

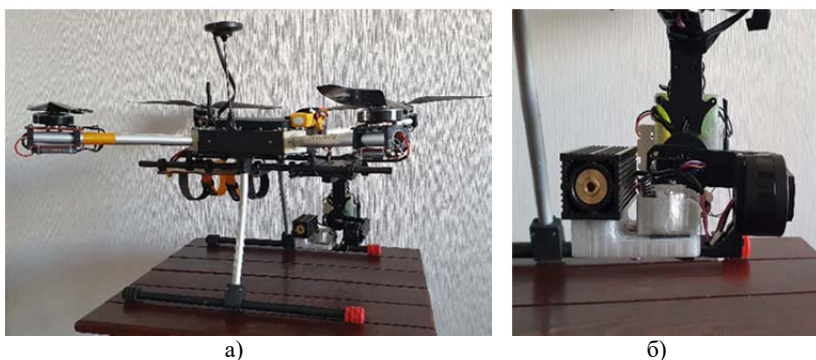


Рис. 4. Специальная робототехническая установка для лазерной обработки с/х культур

На рисунке 4,а представлен общий вид робототехнического устройства для фотостимуляции растений. Устройство состоит из двух частей: БПЛА со специализированным креплением и блока лазерной установки (рис.4,б).

Характеристики БПЛА: время полета 18-22 мин; масса полезной нагрузки 4 кг; взлетная масса 6 кг; максимальная высота полета 1500 м, максимальная скорость полета – 60 км/ч., дальность полета в ручном режиме (с пульта управления) ограничена дальностью связи и составляет 1500-2000 м, а дальность полёта в автономном режиме зависит от запаса энергии и равна 10000 м. Данный квадрокоптер имеет полетный контроллер Pixhawk 4 (с прошивкой PX4). В полетный контроллер встроена инерциальная система навигации, включающая акселерометр, гироскоп и магнитометр, а также барометр. Кроме того, БПЛА оснащен датчиком RTK GPS для высокоточного позиционирования БПЛА в пространстве. Лазерный модуль состоит из лазерного диода, оптической линзы, стабилизатора напряжения и драйвера лазерного диода. Лазерный модуль питается от аккумулятора 2200 мА/ч.

Излучение лазерного модуля имеет форму квадрата 1 на 1 м. Длина волны лазерного излучения равна 638 нм. Характеристики лазерного модуля: постоянная мощность лазера – 1 Вт, поверхностная плотность энергии – 1 Вт/м<sup>2</sup>, угол веерного пучка– 6°.

Для проведения полевого эксперимента был подготовлен специальный опытный участок. На БПЛА был закреплен блок с устройством лазерного излучения (рис. 5). Высота, на которой находится БПЛА на рис.5, равна 1,5 м. Это сделано с целью визуализации работы лазерной установки. Лазерная обработка осуществлялась с высоты полета 10 м, при этом на поле проецировалось квадратное световое пятно размером 1 x 1 метр. Время обработки одного участка с растениями при ширине светового пятна 1 м было задано 3 с. При движении БПЛА со скоростью 0,3 м/с время обработки поля длиной в 200 м и шириной 1 м составило 9 мин. Облучение всходов вегетирующих растений проводилось в два этапа.



Рис. 5. Разработанное устройство в действии

Результаты облучения растений маломощным лазером при помощи БПЛА и предложенного нами алгоритма сведены в таблицу 2. В таблице приведена высота и урожайность многолетних трав 2019 года посева в зависимости от воздействия лазерного облучения.

Таблица 2 Результаты применения алгоритма

Культура, сорт	Высота, см		Урожайность з/м, т/га	
	Контроль	БПЛА	Контроль	БПЛА
<b>Злаковые травы</b>				
Овсяница луговая Бинара	105	96	22,4	21,9
Райграс пастбищный ВИК 22	61	56	13,9	14,0
Фестулолиум Аллегра	61	67	13,6	16,7
Овсяница тростниковая Лира	86	91	20,5	16,4
Овсяница красная Диана	77	87	11,9	11,1
Ежа сборная Хлыновская	110	119	20,4	15,9
<b>Бобовые травы</b>				
Клевер луговой Надежный	85	97	22,1	16,4
Клевер луговой Стодолич	98	103	40,2	64,2
Клевер луговой Делец	103	106	43,0	45,2
Клевер гибридный Маяк	74	74	19,6	19,2
Клевер белый ВИК 70	37	42	23,7	14,0

Согласно методике полевого опыта, отбор проб в контрольной группе проводился случайно в каждом варианте 4 раза. В экспериментальной БПЛА группе отбиралось по 1 образцу. По злаковым травам в контроле НСР05 (наименьшая существенная разность для 5%-ного уровня значимости) составляет 1,043 т/га для зеленой массы и 18,6 кг/га для семян. По клеверам в контроле НСР05 составляет 0,98 т/га для зеленой массы и 5,81 кг/га для семян. В связи с тем, что 2021 год был нехарактерным (аномальным) для исследуемых сельскохозяйственных культур, поэтому необходимо провести дополнительные опыты для того, чтобы проследить тенденцию изменений по годам и посчитать НСР05 по двум факторам. Это позволит отобрать образцы 3-4 раза по каждому варианту – в контрольной и экспериментальной БПЛА группах.

Из полученных результатов видно, что облучение маломощным лазером повлияло на изменение высоты и урожайности с/х культур.

Среди злаковых трав наибольшего эффекта в повышении высоты травостоя удалось достичь при лазерном облучении с БпЛА овсяницы красной с. Диана. Здесь наблюдалось увеличение высоты растений на 13% по сравнению с необлучаемыми растениями контроля. Достаточно высок был также прирост травостоя после облучения у фестулолиума с. Аллегро (10%). Чуть менее выражен был эффект от облучения в аналогичных условиях у ежи сборной с. Хлыновская (8%) и у овсяницы тростниковой с. Лира (6%). Снижение же высоты растений после облучения наблюдалось у двух культур: овсяницы луговой Бинара и у райграса пастбищного (в обоих случаях на 8%). Относительно изменения урожайности зеленой массы (т/га) в результате облучения у злаковых трав наибольший положительный эффект был достигнут у фестулолиума с. Аллегро, урожайность которого увеличилась на 23%. Для остальных культур было характерно или незначительное изменение урожайности (увеличение у райграса пастбищного менее чем на 1% и снижение у овсяницы луговой с. Бинара на 2%), или некоторое снижение данного показателя – на 20 и 22% у овсяницы тростниковой с. Лира и ежи сборной с. Хлыновская соответственно, а также на 7% у овсяницы красной с. Диана.

Лазерная обработка с БпЛа также повлияла и на высоту и урожайность у бобовых трав. Изменение высоты растений происходило для всех культур, кроме клевера гибридного с. Маяк, в случае которого изменения высоты травостоя не произошло. А наиболее заметно увеличилась высота растений клевера лугового с. Надежный (на 14%) и клевера белого с. ВИК 70 (на 13%). Менее существенно увеличилась высота клевера лугового с. Стодолич (на 5%) и клевера лугового с. Делец (на 3%). Оценим влияние лазерного излучения на урожайность бобовых трав. Значительное увеличение урожайности зеленой массы было достигнуто для клевера лугового с. Стодолич – 60%. Менее существенное увеличение урожайности было зафиксировано для клевера лугового с. Делец – 5 %. Лазерное излучение отрицательно повлияло на урожайность клевера гибридного с. Маяк, в случае которого было зафиксировано снижение урожайности на 2 %. Более значительным снижением урожайности было у клевера белого с. ВИК 70 (на 41 %) и у клевера лугового с. Надежный (на 26%).

Таким образом, полученные данные показывают, что лазерное облучение для большей части изучаемых культур увеличивало высоту травостоя (у злаковых – на четырех из шести культур, у бобовых – на четырех из пяти изучаемых культур). В то же время увеличение урожайности зеленой массы наблюдалось у меньшего числа культур (у злаковых – на двух из шести культур, у бобовых – на двух из пяти изу-

чаемых культур). То есть полученный в результате лазерного облучения эффект увеличения травостоя не всегда находил продолжение в увеличении урожайности зеленой массы как злаковых, так и бобовых трав. Однако полная оценка эффективности лазерной стимуляции при обработке кормовых культур возможна после подсчета содержания сырого протеина в кг на 1 га. Тем не менее технология облучения растений является перспективным направлением в современной агропромышленности. Использование специальной установки и разработанного алгоритма для облучения растений позволяет добиться равномерной обработки обширных с/х участков.

Преимуществами разработанной установки являются высокая точность позиционирования за счет RTK GPS, возможность находиться на некотором расстоянии от обрабатываемого участка, чтобы лазерное излучение не попадало на оператора и другую аппаратуру. К преимуществам разработанного алгоритма облучения относится его универсальность. Предлагаемый алгоритм построения пути для равномерного лазерного облучения участка учитывает площадь проекции лазерного луча для обеспечения требуемых характеристик излучения при использовании любой лазерной установки.

**6. Заключение.** Проблема планирования покрывающей траектории для БПЛА рассматривалась многими авторами. Как правило, исследуемые области прямоугольной формы не требуют каких-либо методов дискретизации или декомпозиции. Для прямоугольных участков используются паттерны возвратно-поступательного движения и движения по спирали. Главным преимуществом использования этих паттернов движения является относительно малое время вычислений для поиска покрывающей траектории, а сами вычисления могут выполняться на борту БПЛА. Время расчета покрывающей траектории при помощи разработанного алгоритма для всех рассмотренных экспериментов не превышает 1 с.

Для практического тестирования разработанных решений был разработан прототип устройства, предназначенного для лазерной обработки растений в фазе вегетации в ночное время. Был проведен полевой эксперимент, который заключался в лазерной обработке участка поля длиной в 200 м и шириной 1 м. Траектория полета была рассчитана разработанным алгоритмом планирования покрывающей траектории. При движении БПЛА вдоль этой траектории со скоростью 0,3 м/с время обработки поля составило 9 мин. Предложенный способ позволяет интегрировать на БПЛА лазерный модуль с любым углом излучения, так как алгоритм учитывает этот параметр при построении марш-

рута. Это доказывает универсальность метода с точки зрения используемой аппаратуры.

Применение БПЛА мультикоптерного вида для обработки с/х полей имеет ряд преимуществ: легкая настройка скорости движения при облучении, высоты облучения, площади покрытия лазером для расчёта оптимальной траектории полета; возможность удержания положения в точке обработки на заданное время; стабильный полёт за счет используемого контроллера (углы крена, тангажа и рыскания не меняются, поэтому лазерный луч падает строго вниз, без отклонений, равномерно покрывая весь участок облучения); возможность автономной работы (в память БПЛА записывается полетная миссия, которая выполняется полностью автономно, без участия оператора).

Однако при работе с БПЛА необходимо учитывать несколько важных аспектов, таких как физические характеристики аппарата, время работы, ограничения на вес полезной нагрузки, внешние условия окружающей среды и др. Кроме того, на эффективность работы БПЛА влияют маневры и погодные условия, которые увеличивают потребление энергии при выполнении полетов на открытом воздухе [26,27].

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию разработанного алгоритма: минимизацию длины пути БПЛА, времени выполнения миссии и количества поворотов, а также учет погодных условий при планировании маршрута. Также будут рассмотрены вопросы учета допустимого угла поворота и оптимальной скорости для минимизации потребления энергии.

### Литература

1. Букатый В.И., Вечернина Н.А., Карманчиков В.П. Лазерная фотоактивация семян сельскохозяйственных культур Алтая // Известия Алтайского государственного университета. 2001. № 1. С. 98–99.
2. Rakosy-Tican L., Aurori C.M., Morariu V.V. Influence of near null magnetic field on in vitro growth of potato and wild Solanum species // Bioelectromagnetics. 2005. vol. 26. pp. 548–557.
3. Kovács E., Keresztes Á. Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells // Micron. 2002. vol. 33: pp. 199–210
4. Podlešný J. The effect of seed irradiation with laser and plant desiccation on yielding and quality features of white lupine seeds // Acta Agrophysica. 2007. vol. 9. Issue 3. pp. 733–745.
5. Chen Y.P., Jia J.F., Yue M. Effect of CO<sub>2</sub> laser radiation on physiological tolerance of wheat seedlings expose to chilling stress // Photochem Photobiol. 2010. vol. 86. pp. 600–605.
6. Инюшин В.М., Ильясов Г.У., Федорова Н.Н. Луч лазера и урожай // Издательство: Алма-Ата: Кайнар. 1981. 188 с.

7. Журба П.С., Журба Т.П., Журба Е.П. Способ промышленного возделывания сельскохозяйственных культур с использованием лазерного облучения // Патент РФ RU 2240663 С1. 2004.
8. Брижанский Л.В., Кузнецов П.Н., Кузнецова А.П. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на семена болгарского перца и огурца // Наука и Образование. 2019. Т. 2. № 4. С. 201.
9. Чельшьева Д.Н. Эффективность лазерного облучения семян тыквы и арбуза // Всероссийский Фестиваль науки студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК», посвященный 100-летию академика Д.К. Беляева: сборник материалов Всероссийских научно-методических конференций с международным участием. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА. 2017. С. 269–271.
10. Скотникова А.И. Влияние лазерного излучения на всхожесть и урожайность сельскохозяйственных культур // Молодежь - науке и практике АПК: материалы 100-й Международной научно-практической конференции студентов и магистрантов. Витебск: ВГАВМ. 2015. С. 90.
11. Будаговский А.В., Будаговская О.Н. Фотоника в сельском хозяйстве и природопользовании, перспективные направления развития // Лазер-Информ. 2016. № 15-16 (582–583). С. 1–7.
12. Курьянов С.А. Устройство для автоматического лазерного досвечивания растений // Материалы международной научно-практической конференции «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях». 2014. С. 222–225.
13. Курьянов С.А. Инфракрасная лазерная досветка как метод повышения продуктивности томатов. Материалы V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики (АПК)». 2014. С. 183–185.
14. Lottes P. et al. UAV-Based Crop and Weed Classification for Smart Farming. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. pp. 3024–3031.
15. Lebedev I., Izhboldina V. Method for Inspecting High-voltage Power Lines Using UAV Based on the RRT Algorithm. Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR) 2021). 2022. pp. 179–190.
16. Di Franco C., Buttazzo G. Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs // Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). 2015. pp. 111–117.
17. Di Franco C., Buttazzo G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints // J. Intell. Robot. Systems. 2016. pp. 1–18.
18. Choset H. Coverage for robotics—A survey of recent results // Ann. Math. Artif. Intell. 2001. pp. 113–126.
19. Andersen H.L. Path Planning for Search and Rescue Mission Using Multicopters // Master's Thesis. Institutt for Teknisk Kybernetikk. 2014. 137 p.
20. Coombes M., Chen W.H., Liu C. Boustrophedon Coverage Path Planning for UAV Aerial Surveys in Wind // Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2017. pp. 1563–1571.
21. Osborne M. Mission Planner-Ground Station. URL: <http://planner.ardupilot.com> (дата обращения: 21.08.2021).
22. Cabreira T.M., Di Franco C., Ferreira P.R., Jr., Buttazzo G.C. Energy-Aware Spiral Coverage Path Planning for UAV Photogrammetric Applications // IEEE Robot. Autom. Lett. 2018. vol. 3. pp. 3662–3668.
23. Cabreira T.M., Brisolaro L.B., Ferreira Jr. P.R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles // Drones. 2019. vol. 3(1). pp. 4.



24. Avellar G.S., Pereira G.A., Pimenta L.C., Iscold P. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time // *Sensors*. 2015. vol. 15(11). pp. 27783–27803.
25. Vasquez-Gomez J.I., Marciano-Melchor M., Valentin L., Herrera-Lozada J.C. Coverage path planning for 2d convex regions // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. vol. 97(1). pp. 81–94.
26. Даниловских С.М., Даниловских М.Г., Винник Л.И. Способ лазерной обработки растений с беспилотного летательного аппарата // Патент РФ RU 2740543. 2021.
27. Barrientos A., et al. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area // *J. Field Robot.* 2011. vol. 28. pp. 667–689.

**Севостьянова Наталья Николаевна** — д-р биол. наук, доцент, директор, ООО «НовБиотех». Область научных интересов: биомедицина, биотехнологии, геронтология и гериатрия. Число научных публикаций — 95. [snn79@yandex.ru](mailto:snn79@yandex.ru); Парковая, 14-2, 173020, Великий Новгород, Россия; р.т.: +7(911)6223948.

**Лебедев Игорь Владимирович** — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: управление БПЛА, разработка конструкций БПЛА мультироторного типа. Число научных публикаций — 7. [igorlevedev@gmail.com](mailto:igorlevedev@gmail.com); 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(931)3589135.

**Лебедева Валерия Валентиновна** — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: групповое управление, мультиагентные системы, БПЛА. Число научных публикаций — 6. [izhboldina.valeriia@gmail.com](mailto:izhboldina.valeriia@gmail.com); 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(931)314940.

**Ватаманюк Ирина Валерьевна** — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: групповая робототехника, алгоритмы навигации робототехнических систем. Число научных публикаций — 52. [vatamaniuk@iiias.spb.su](mailto:vatamaniuk@iiias.spb.su); 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

**Поддержка исследований.** Исследование выполнено за счёт гранта по программе «Старт-1» от Фонда содействия инновациям (договор № 3653ГС1/60667).

N. SEVOSTYANOVA, I. LEBEDEV, V. LEBEDEVA, I. VATAMANIUK  
**AN INNOVATIVE APPROACH TO AUTOMATED PHOTO-  
ACTIVATION OF CROP ACREAGE USING UAVS TO  
STIMULATE CROP GROWTH**

*Sevostyanova N., Lebedev I., Lebedeva V., Vatamaniuk I. An Innovative Approach to Automated Photo-Activation of Crop Acreage Using UAVs to Stimulate Crop Growth.*

**Abstract.** Photoactivation of plants by laser treatment is a promising direction in the development of modern agricultural production. Treatment of plants with radiation with specified characteristics stimulates the development of plants, the formation of generative traits and an increase in yield. An approach based on the use of a specialized laser installation mounted on an unmanned aerial vehicle (UAV) is proposed to automate the process of photoactivation of large cultivated areas. It is possible to perform laser activation of large areas with minimal expenditure of time and human resources due to autonomous processing of the field with the help of UAVs. An algorithm for calculating a covering trajectory for covering large rectangular areas with a laser spot with given characteristics is proposed in the paper. A methodology for calculating the required power of the laser installation depending on the altitude and flight time of the UAV is presented. The advantage of the developed approach is its versatility, since this approach takes into account the characteristics of a laser installation and can be used with devices of various types. Depending on the laser parameters, the algorithm builds such a trajectory for the UAV so that the irradiation of plant seedlings is uniform throughout the entire processing process. Field experiments were conducted when the UAV moved along the calculated trajectory at a speed of 0.3 m/s and the average processing time for a field 200 m long and 1 m wide was 9 minutes. The results of field experiments show that laser irradiation on most of the studied crops increased the yield and height of the stand (in cereals - in four out of six crops, in legumes - in four out of five studied crops). The proposed algorithm for constructing a path for uniform laser irradiation of a site takes into account the area of the laser spot to ensure the required radiation characteristics when using any laser installation.

**Keywords:** laser installation, plant growth stimulation, UAV, agriculture, path planning, covering trajectory planning, low-power laser, laser photoactivation.

**Sevostyanova Natalya** — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Director, NovBiotech, LLC. Research interests: biomedicine, biotechnology, gerontology and geriatrics. The number of publications — 95. [snn79@yandex.ru](mailto:snn79@yandex.ru); 14-2, Parkovaya str., 173020, Veliky Novgorod, Russia; office phone: +7(911)6223948.

**Lebedev Igor** — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: uAV control, development of multirotor type UAV designs. The number of publications — 7. [igorlevedev@gmail.com](mailto:igorlevedev@gmail.com); 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(931)3589135.

**Lebedeva Valeria** — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: group control, multi-agent systems, UAVs. The number of publications — 6. [izhboldina.valeriia@gmail.com](mailto:izhboldina.valeriia@gmail.com); 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(931)314940.

**Vatamaniuk Irina** — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: group robotics, algorithms of navigation of robotic systems. The number of publications — 52. vatamaniuk@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

**Acknowledgements.** This research is supported by grant under the «Start-1» program from the Innovation Promotion Fund (contract No. 3653ГC1/60667).

## References

1. Bukat'j V.I., Vechernina N.A., Karmanchikov V.P. [Laser photoactivation of seeds of agricultural crops in Altai]. *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta – Izvestiya – of Altai State University Journal*. 2001. vol. 1. pp. 98–99. (In Russ.).
2. Rakosy-Tican L., Aurori C.M., Morariu V.V. Influence of near null magnetic field on in vitro growth of potato and wild Solanum species. *Bioelectromagnetics*. 2005. vol. 26. pp. 548–557.
3. Kovács E., Keresztes Á. Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells. *Micron*. 2002. vol. 33. pp. 199–210
4. Podlešny J. The effect of seed irradiation with laser and plant desiccation on yielding and quality features of white lupine seeds. *Acta Agrophysica*. 2007. vol. 9. Issue 3. pp. 733–745
5. Chen Y.P., Jia J.F., Yue M. Effect of CO<sub>2</sub> laser radiation on physiological tolerance of wheat seedlings expose to chilling stress. *Photochem Photobiol*. 2010. vol. 86. pp. 600–605.
6. Injushin V.M., Il'jasov G.U., Fedorova N.N. Luch lazera i urozhaj [Laser beam and harvest]. Izdatel'stvo: Alma-Ata: Kajnar. 1981.188 p. (In Russ.).
7. Zhurba P.S., Zhurba T.P., Zhurba E.P. Sposob promyshlennogo vozdeľyvanija sel'skohozjajstvennyh kul'tur s ispol'zovaniem lazernogo obluchenija [Method for Commercial Cultivation of Farm Crops with the Use of Laser Radiation]. Patent RF. 2004. 9 p. (In Russ.).
8. Brianski L.V., Kuznetsov P.N., Kuznetsova A.P. [Effect of Low-Intensity Laser Radiation on Bell Pepper and Cucumber Seeds]. *Nauka i Obrazovanie – Science and education*. 2019. vol. 2. no. 4. pp. 201. (In Russ.).
9. Chelysheva D.N. [Efficiency of Laser Irradiation of Pumpkin and Watermelon Seeds] // Vserossijskij Festival' nauki studentov, aspirantov i molodyh uchenykh «Nauka i molodezh': novye idei i reshenija v APK», posvjashhenyj 100-letiju akademika D.K. Beljaeva: sbornik materialov Vserossijskikh nauchno-metodicheskikh konferencij s mezhdunarodnym uchastiem [All-Russian Festival of Science of Students, Postgraduates and Young Scientists "Science and Youth: New Ideas and Solutions in the Agro-Industrial Complex", dedicated to the 100th anniversary of Academician D.K. Belyaeva: collection of materials from All-Russian scientific and methodological conferences with international participation]. Ivanovo: FGBOU VO Ivanovskaja GSHA. 2017. pp. 269–271. (In Russ.).
10. Skotnikova A.I. [Influence of laser radiation on the total and productivity of agricultural crops]. *Molodezh' - nauke i praktike APK: materialy 100-j Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii studentov i magistrantov [Youth – to the science and practice of the agro-industrial complex: materials of the 100th International scientific-practical conference of students and undergraduates]*. Vitebsk: VGAVM. 2015. pp. 90. (In Russ.).
11. Budagovskiy A.V., Budagovskaya O.N. [Photonics in agriculture and nature management, promising directions of development]. *Lazer-Inform – Lazer-Inform*. 2016. vol. 15-16 (582–583). pp. 1–7. (In Russ.).

12. Kur'yanov S.A. [Device for automatic laser supplementary illumination of plants]. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Robototehnika v sel'skhozjajstvennyh tehnologijah» [Materials of the international scientific-practical conference "Robotics in agricultural technologies"]. 2014. pp. 222–225. (In Russ.).
13. Kur'yanov S.A. [Infrared laser supplementary lighting as a method of increasing the productivity of tomatoes]. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy jenergetiki (APK)» [Materials of the V International Scientific and Practical Conference "Actual Problems of Energy (AIC)"]. 2014. pp. 183–185. (In Russ.).
14. Lottes P. et al. UAV-Based Crop and Weed Classification for Smart Farming. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. pp. 3024–3031.
15. Lebedev I., Izhboldina V. Method for Inspecting High-voltage Power Lines Using UAV Based on the RRT Algorithm. Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR) 2021). 2022. pp. 179-190.
16. Danilovskikh S.M., Danilovskikh M.G., Vinnik L.I. Sposob lazernoj obrabotki rastenij s bespilotnogo letatel'nogo apparata [Method for laser processing of plants from an unmanned aerial vehicle]. Patent RF RU 2740543. 2021. (In Russ.).
17. Di Franco C., Buttazzo G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints. J. Intell. Robot. Systems. 2016. pp. 1–18.
18. Choset H. Coverage for robotics—A survey of recent results. Ann. Math. Artif. Intell. 2001. pp. 113–126.
19. Andersen H.L. Path Planning for Search and Rescue Mission Using Multicopters. Master's Thesis. Institutt for Teknisk Kybernetikk. 2014. 137 p.
20. Coombes M., Chen W.H., Liu C. Boustrophedon Coverage Path Planning for UAV Aerial Surveys in Wind. Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2017. pp. 1563–1571.
21. Osborne M. Mission Planner-Ground Station. Available at: <http://planner.ardupilot.com> (accessed: 21.08.2021).
22. Cabreira T.M., Di Franco C., Ferreira P.R., Jr., Buttazzo G.C. Energy-Aware Spiral Coverage Path Planning for UAV Photogrammetric Applications. IEEE Robot. Autom. Lett. 2018. vol. 3. pp. 3662–3668.
23. Cabreira T.M., Brisolara L.B., Ferreira Jr. P.R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. Drones. 2019. vol. 3(1). pp. 4.
24. Avellar G.S., Pereira G.A., Pimenta L.C., Iscold P. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time. Sensors. 2015. vol. 15(11). pp. 27783–27803.
25. Vasquez-Gomez J.I., Marciano-Melchor M., Valentin L., Herrera-Lozada J.C. Coverage path planning for 2d convex regions. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2020. vol. 97(1). pp. 81–94.
26. Danilovskikh S.M., Danilovskikh M.G., Vinnik L.I. Sposob lazernoj obrabotki rastenij s bespilotnogo letatel'nogo apparata // Patent RF RU 2740543. 2021.
27. Barrientos A., et al. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area. J. Field Robot. 2011. vol. 28. pp. 667–689.

А.Е. Мозохин

## МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМФОРТНОГО СОСТОЯНИЯ МИКРОКЛИМАТА УМНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ НЕЧЕТКИХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Мозохин А.Е. Методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей.*

**Аннотация.** Анализ применения технологии умный дом указывает на недостаточный уровень управляемости его инфраструктурой, что приводит к избыточному потреблению энергетических и информационных ресурсов. Проблема управления цифровой инфраструктурой жилого пространства человека, связана с большим числом узкоспециализированных решений по домашней автоматизации, которые усложняют процесс управления. Умный дом рассматривается как множество независимых киберфизических устройств направленных на достижение своей цели. Для согласованной работы киберфизических устройств предлагается обеспечивать их совместную работу через единый информационный центр. Моделирования режимов работы устройств в цифровой среде сохраняет ресурс физических устройств, производя виртуальный расчет для всевозможных вариантов взаимодействия устройств между собой и физической средой. Разработана методика управления микроклиматом умного дома с применением ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей, на примере совместного использования кондиционера, вентиляции и отопления. Алгоритм работы нейронной сети позволяет контролировать параметры состояния физической среды, прогнозировать режимы работы киберфизических устройств и формировать сигналы управления для каждого из них, обеспечивая совместную работу устройств с минимальным ресурсопотреблением и информационным трафиком. Предложен вариант практической реализации системы управления микроклиматом умного дома на примере многофункционального учебного компьютерного класса. Разработаны гибридные нейронные сети систем кондиционирования, вентиляции и отопления. Произведено тестирование работы системы управления микроклиматом многофункциональной аудитории университета с применением гибридных нейронных сетей, в качестве устройства управления использован программируемый логический контроллер отечественного производства. Целью управления на основе взаимодействующих киберфизических устройств является достижения минимума используемой мощности и информационного трафика при их совместной работе.

**Ключевые слова:** умный дом, ансамбль искусственных нейронных сетей, система климат-контроля, система управления, киберфизические устройства.

**1. Введение.** В настоящее время технология умный дом рассматривается разработчиками с позиции её взаимодействия со смежными быстро развивающимися технологиями, такими как умный город, умная сеть. Технология умный дом в работах [1-3] рассматривается исключительно как связующее звено между потребителем услуг и сервисами, находящимися за пределами самого дома. Однако, комфорт потребителей и эффективность функционирования интегрированных интеллектуальных устройств жилого пространства человека определя-

ется не только их взаимосвязью с внешними системами и сервисами, а главным образом энергетическими и информационными взаимодействиями между компонентами жилого пространства [4, 5].

По потенциалу развития жилое пространство человека не уступает сложным системам промышленных предприятий и организаций. С ростом числа цифровых технологий и их распространением жилое пространство становится настоящим полигоном для тестирования современных киберфизических систем [6, 7]. Поэтому возникает потребность в создании новых решений для обеспечения энергоэффективности зданий, офисов, социально-значимых объектов (школ, больниц, университетов), где человек находится большую часть времени, чтобы сделать пребывание в них комфортным, используя современные технологии [8].

Актуальной проблемой применения технологии умный дом является значительный поток данных с инфраструктурных систем жизнеобеспечения, который приводит к завышению требований к вычислительным ресурсам и сложности оперативной обработки информации. Также проблемой является завышенный расход энергоресурсов компонентами систем умного дома, связанный с несогласованностью режимов работы устройств, в процессе их функционирования. Так совместная работа систем отопления, вентиляции, кондиционирования приводит к росту энергопотребления при их несогласованной работе на достижении цели поддержания микроклимата жилого пространства [9].

Основная причина, снижающая эффективность совместного функционирования устройств климат-контроля в помещениях умного дома, является наличие иерархических систем управления направленных на выполнения частных задач. Это приводит к противоречиям в совместной работе устройств кондиционирования, вентиляции и отопления воздуха, и создает условия для конфликтов между рассредоточенными системами управления при распределении и потреблении ресурсов на этапах технологических процессов в жилых помещениях умного дома [10, 11].

Цифровизация жилого пространства человека позволяет достичь требуемого уровня управляемости и наблюдаемости системами жизнеобеспечения путем внедрения технологий интернета вещей, интеллектуального учета и накопления электроэнергии. Однако, попытки интеграции данных с цифровых устройств умного дома в единую информационную систему приводят к сложностям, связанным с отсутствием единого стандарта информационного обмена между информационными системами разных производителей, несогласованной работой си-

стем жизнеобеспечения зданий и сооружений, генерацией избыточно-го информационного трафика в сеть и ряд других факторов [12, 13].

Ранее в работе [14] была подробно рассмотрена методология формирования информационного пространства и киберфизических устройств умного дома, а в исследовании [15] предложена концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации. Согласно данной концепции любая интеллектуальная система должна имеет общий центр согласования целевых ориентиров входящих в ее состав подсистем, для мониторинга и распределения используемых ресурсов, а также оценки достигаемых синергетических эффектов. При этом виды взаимодействия систем и их составных элементов должны быть подчинены технологическим и организационным правилам функционирования отдельных ее элементов. В развитии теории и практики создания методов управления сложными системами, требуется исследовать методы анализа и обработки данных сетевых устройств для решения задачи предиктивного управления компонентами сложных систем, обеспечивающих комфортное состояния в местах длительного пребывания человека при минимальном ресурсопотреблении, на примере системы климат-контроля умного дома.

**2. Постановка задачи исследования.** Будем исходить из предположения, что энергетическое и информационное пространства умного дома являются сложной системой и относятся к классу система систем. В качестве объекта исследования рассмотрим помещение многофункционального учебного компьютерного класса в университете, который предназначен для непрерывного нахождения в нем студентов и преподавателей в количестве не более 30 человек. Само помещение состоит из многофункциональной аудитории, гардеробной, комнаты приема пищи и комнаты психологической разгрузки. План помещения представлен на рисунке 1.

При проектировании многофункциональной аудитории не было предусмотрено автоматическое регулирование параметров воздуха в помещении. Конструктивно устройства могут регулировать параметры температуры, влажности, скорости воздушного потока, чистоту воздуха и содержание в нем углекислого газа.

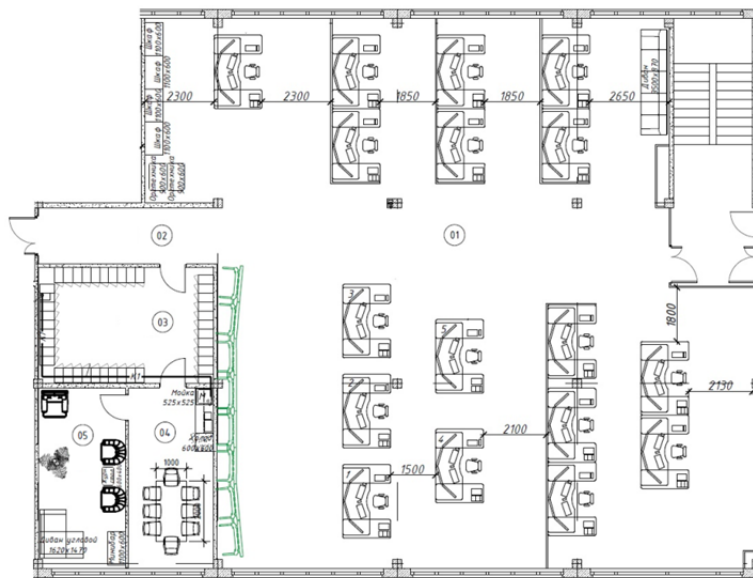


Рис. 1. План помещения многофункционального учебного компьютерного класса в университете, где 1 – многофункциональная аудитория, 2 – коридор, 3 – гардеробная, 4 – комната приема пищи, 5 – комната психологической разгрузки

Однако отсутствие единого информационного центра согласования режимов работы устройств климат-контроля для поддержания качественных и количественных показателей воздуха в помещении является проблемой. Отсутствие системы регулирования параметров физической среды делает пребывание людей в помещении дискомфортным, вызывает у них замедленную реакцию и повышенную усталость, а также приводит к неэффективному расходованию электроэнергии на поддержания микроклимата помещения.

Для решения проблемы неоптимального управления и создания комфортных условий пребывания людей в многофункциональной аудитории, была проведена экспертиза помещения, включающая следующие этапы:

- анализ и структурирование данных о значениях показателей физической среды в помещении на текущий момент времени, динамика их развития за заданный интервал времени и некоторый ретроспективный анализ последствий не устранения проблемной ситуации.
- ранжирование показателей физической среды по степени их влияния на развитие ситуации в будущем.



- формирование набора действий - альтернатив, которые могут привести к устранению проблемной ситуации.
- выбор программных и технических способов реализации системы управления для входного контроля показателей физической среды и выходного управления параметрами исполнительных механизмов устройств воздействия.

Отсортированные, обработанные и усредненные данные поступают в центр принятия решений, где из возможных альтернатив выбираются те, что удовлетворяют целям системы управления микроклимата. Центр принятия решения вырабатывает управленческие воздействия для регулирования параметров физической среды. Современные устройства климат-контроля позволяют регулировать параметры температуры, влажности и содержание углекислого газа в воздухе, а значит необходимо разработать универсальную методику управления микроклиматом умного дома, для различных типов устройств и их функциональных возможностей.

Целью управления системой микроклимата умного дома считают поддержание комфортных условий пребывания людей в жилом пространстве, в соответствии со всеми нормами и правилами охраны труда, при минимальном энергопотреблении и времени выхода на требуемые параметры физической среды в помещениях. Особенностью реализации на практике данной цели будет являться применение киберфизических устройств, взаимодействующих в единой цифровой среде.

**3. Дерево целей системы микроклимата умного дома.** Собранная первичная информация о состоянии физической среды умного дома была использована для формирования дерева целей системы микроклимата многофункциональной аудитории, которое представлено на рисунке 2. Первый уровень дерева целей - это поддержание комфортного для человека состояния физической среды помещения. Второй уровень дерева целей состоит из трех ветвей включающих поддержание температурного и влажностного режима, а также содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе помещения. Третий уровень дерева целей состоит из ряда показателей температуры, влажности и содержания  $\text{CO}_2$ , включая их нормативные, предупредительные и аварийные пределы. Многоуровневое представление дерева целей способствует решению оперативных, тактических и стратегических задач системы микроклимата помещения и обеспечивает согласованное управление устройствами кондиционирования, вентиляции и отопления.



Рис. 2. Дерево целей микроклимата многофункциональной аудитории, где ПУ - предупредительный уровень, НУ - нормативный уровень, АУ - аварийный уровень параметров физической среды помещения

Система управления микроклиматом умного дома должна принимать, обрабатывать и накапливать информацию для выработки оперативных, тактических и стратегических решений. Поэтому сформированному дереву целей должна соответствовать интегрированная информационная система, выполняющая функции:

- принимает информацию с датчиков температуры, влажности и содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе помещения по проводным и беспроводным каналам связи;
- обрабатывает поступающую информацию на предмет достоверности или избыточности;
- контролирует соответствие текущих параметров физической среды нормативным, предупредительным и аварийным пределам;
- накапливает информацию о параметрах физической среды, обработанных значений за день, за неделю, за месяц. В первом случае, данные нужны для принятия оперативных решений в части функционирования устройств климат-контроля. Во втором случае, для принятия тактических решений связанных с необходимостью перенастройки системы, расчета её энергоэффективности. В третьем случае, для проактивного управления в части модернизации системы микроклимата.

**4. Разработка алгоритма управления системой кондиционирования на основе нечетких искусственных нейронных сетей.** Существующие на данный момент регрессионные модели для описания процесса поддержания микроклимата в помещениях, не охватывают всех имеющихся зависимостей в рабочем диапазоне характеристик физической среды и режимов работы оборудования разного функционального и конструктивного исполнения [16, 17]. Наиболее перспективным направлением в области выработки предиктивного управляющего воздействия на сегодняшний день является использование математического аппарата нечетких искусственных нейронных сетей [18,

19]. Это объясняется тем, что особенностью сложных систем является наличие большого числа факторов, которые влияют на исследуемый показатель, а также ограниченного объема наблюдений данных факторов, используемых при построении модели [20]. Также, в некоторых случаях эти факторы имеют качественный характер и не могут быть измерены при помощи метрических шкал [21]. В условиях слабой математической формализации процессов, протекающих в сложных системах, и ограниченного объема статистических данных возрастает роль экспертной информации, используемой в процессе моделирования [22]. Данные обстоятельства снижают эффективность применения известных вариантов интеллектуальной обработки данных и указывают на необходимость использования в процессе построения моделей аппарата нечетких искусственных нейронных сетей.

Выбор данного аппарата интеллектуальной обработки данных не случаен, так нечеткие алгоритмы позволяют успешно решать задачи, в которых исходные данные являются ненадежными и слабо формализованными. При этом информационные системы, основанные на применении аппарата нечеткой логики, являются универсальными аппроксиматорами [23]. При реализации алгоритмов управления на основе нечетких искусственных нейронных сетей необходимо учитывать свойственные алгоритмам нечеткого логического вывода недостатки, связанные с субъективностью выбора вида и параметров функций принадлежности, а также исходного набора нечетких продукционных правил. Для устранения указанных недостатков нечетких систем возможно обеспечить их адаптивность, корректируя по мере построения модели на основе реальных статистических данных правила и параметры функций принадлежности. Один из вариантов такой адаптации реализуется при построении гибридных нейронных сетей [24].

Далее подробно рассматривается разработка нейронной сети для кондиционера. Структурная схема гибридной нейронной сети представлена на рис. 3. Данная сеть использует алгоритм Сугэно (Sugeno) 1-го порядка, в этом случае правила описываются линейными зависимостями [25, 26]. В ходе исследования были проведены вычисления в среде Scilab с использованием программного пакета Fuzzy Logic. В качестве нейронной сети для обработки параметров температуры, влажности и содержания углекислого газа в воздухе помещения использовался многослойный перцептрон с одним скрытым слоем [27].

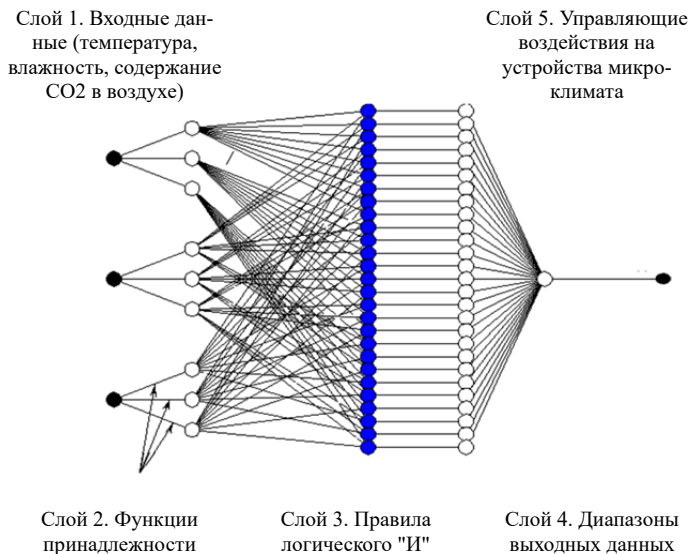


Рис. 3. Структура нейронной сети для управления микроклиматом умного дома

Из рисунка 3 видно, что гибридная нейронная сеть состоит из 5-ти слоев, каждый из которых решает конкретную задачу. Результатом работы нейронной сети являются формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы устройств микроклимата умного дома: кондиционера, вентиляции и радиаторов отопления.

**4.1. Создание первичного набора данных для нейронной сети.** На первый слой поступает информация о температуре, влажности и содержании углекислого газа в воздухе, измеренные IoT-датчиками в разных частях помещения. В момент обучения нейронной сети исходные данные берутся из обучающей выборки, далее сеть обрабатывает данные о характеристиках физической среды, полученные в режиме реального времени. Измеренные значения ( $T$ ,  $W$  и  $CO_2$ ) передаются на второй слой сети, где происходит этап формирования принадлежности к группе нечетких множеств.

Для формирования первичного набора данных использовались результаты экспериментальных исследований, проведенных в рамках данного помещения и подобных помещений, оснащенных системами климат-контроля, труды по микроклимату замкнутых помещений, а также рекомендации экспертов по работе систем микроклимата. Первичные данные делятся по группам в соответствии с их свойствами.

**4.2. Формирование принадлежности входных данных к группе нечетких множеств.** Функции принадлежности определяют соответствия между входными данными и нечеткими множествами. На рис. 4 видно, что входные данные относятся к одной из 27 групп, из области значений входных векторов.

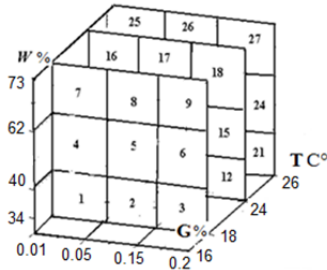


Рис. 4. Определение принадлежности входных данных, где  $T$  – значение температуры,  $W$  – значение влажности и  $G$  – содержание углекислого газа в воздухе помещения

Функции, определяющие принадлежность по температуре и влажности окружающей среды к одному из трех нечетких множеств, представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

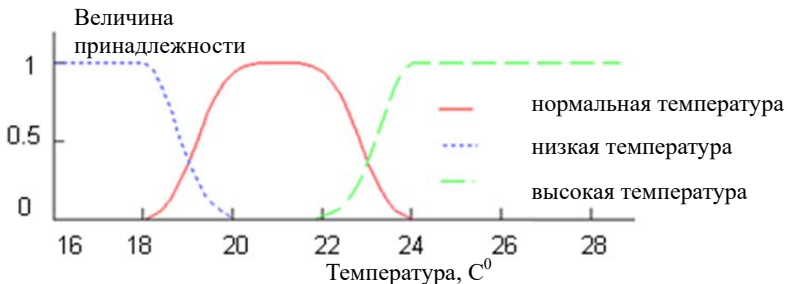


Рис. 5. Нечеткие множества для температуры в помещении

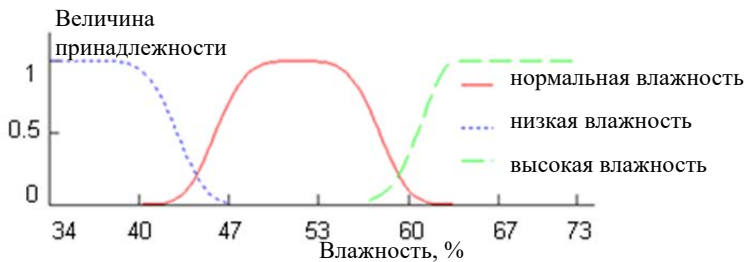


Рис. 6. Нечеткие множества для влажности воздуха в помещении

Нечеткие множества по температуре и влажности, представленные на рис. 5 и 6, сформированы на основании рекомендаций СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [28]. В соответствии с рекомендациями, значение температуры воздуха в учебной аудитории должно находиться в пределах 18-24 °С. В случае если температура в помещении ниже 18 °С, то она считается низкой и имеет низкую степень комфорта для человека. Если же температура воздуха выше 24 °С можно говорить о перегреве в помещении. В промежуточных значениях можно относить температуру физической среды к одной, либо к другой группе. Влажность воздуха в помещении также делится на три группы. Воздух нормальной влажности со значением 40-60 %, воздух высокой влажности со значением более 60 %. Сухой воздух с влажностью менее 40 %.

Качественная характеристика воздуха, такая как содержание углекислого газа, в нейронной сети выполняет роль уточняющего параметра. Это означает, что содержание углекислого газа будет уточнять режимы работы устройств климат-контроля, которые будут получены по сочетанию двух основных параметров. В связи с тем, что температура и влажность воздуха в помещении меняется существеннее и чаще, то по этим параметрам будет определяться основное смещение исходного режима работы устройств.

Нечеткие множества по содержанию углекислого газа представленные на рис. 7, сформированы на основании рекомендаций ГОСТ Р ЕН 13779-2007 «Вентиляция для нежилых зданий. Требования к рабочим характеристикам для вентиляционных и кондиционерных комнатных систем» [29]. Воздух с нормальным содержанием CO<sub>2</sub> – это воздух со значением CO<sub>2</sub> 0.01-0.05 %. Повышенное содержание CO<sub>2</sub> 0.05-0.15 %. Если содержание CO<sub>2</sub> высокое, то его диапазон выше 0.15 %. Параметры микроклимата в помещениях, согласно которых с 0.15 % у человека снижается внимание и концентрация, а начиная с 0.2 % при длительном нахождении в помещении наблюдается головная боль, тошнота и недомогания.

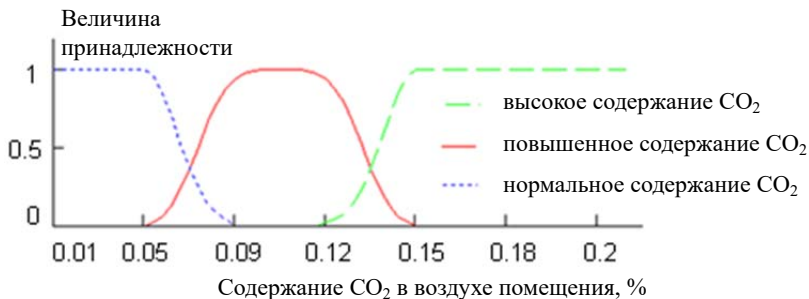


Рис. 7. Нечеткие множества по содержанию CO<sub>2</sub> в воздухе помещения

Далее каждому набору входных нечетких данных ставится в соответствие диапазон выходных управляющих воздействий на исполнительные аппараты устройств управления. Для этой цели создаются правила функционирования нейронная сеть.

**4.3. Создание обучающей выборки и логических правил работы нейронной сети.** Чтобы сформировать правила соответствия входных данных выходным, было проведено исследование связи режимов работы устройств климат-контроля: энергопроизводительность, расход воздуха, с параметрами температуры, влажности и содержания углекислого газа в воздухе помещения.

Данные по режимам работы кондиционеров брались из исследовательских работ [30, 31] с большой экспериментальной базой, а также из рекомендации экспертов по управлению режимами работы кондиционера при поддержании нормального температурного режима в помещении и сохранении качества воздуха. Несмотря на то, что многие данные из справочников и пособий были получены для кондиционеров других марок и годов выпуска, они остаются справедливыми для их современных аналогов.

Связь режимов работы вентиляции от качественных и количественных параметров воздуха в помещении описаны в справочниках для приточно-вытяжных вентиляционных установок, а также в пособиях по системам вентиляции и кондиционирования воздуха в закрытых помещениях.

В таблице 1 представлены обобщенные рекомендации по режимам работы кондиционера в зависимости от параметров физической среды. Представленные в таблице 1 данные использовались для обучения нейронной сети. Далее описание функционирования нейронной сети будет производится на примере кондиционера. Аналогичный по-

рядок настройки и функционирования нейронной сети справедлив для устройств вентиляции и отопления.

Таблица 1. Обобщенные рекомендации по режимам работы кондиционера в зависимости от параметров физической среды

№	Параметры физической среды помещения			Обобщенные рекомендуемые режимы работы кондиционера		
	Температура, Т	Влажность, W	Содержание CO <sub>2</sub> , G	Энергопроизводительность (лето), kw	Энергопроизводительность (зима), kw	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /h
1	T <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	0.5-1	7-8	1900-2150
2	T <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	1-1.5	8-9	2150-2350
3	T <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>3</sub>	1.5-2	9-10	2350-2650
4	T <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	2.5-3.5	9.5-11	2150-2350
5	T <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	3.5-4	11-12	2350-2650
6	T <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	4-5	12-13	2650-2900
7	T <sub>1</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>1</sub>	1-1.5	10.5-12	2350-2650
8	T <sub>1</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	1.5-2	12-13	2650-2900
9	T <sub>1</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>3</sub>	2-2.5	13-14	2900-3100
10	T <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	2-4	1-3	1600-1800
11	T <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	4-6.5	3-5	1800-2000
12	T <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>3</sub>	6.5-8	5-8	2000-2200
13	T <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	2-4	2-4	1800-2000
14	T <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	4-6	4-6	2000-2200
15	T <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	6-9	6-9	2200-2400
16	T <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>1</sub>	3-5	3-5	2300-2500
17	T <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	5-8	5-8	2500-2700
18	T <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>3</sub>	8-11	8-11	2700-2900
19	T <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	7-8	0.5-1	1700-1800
20	T <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	8-9	1-1.5	1800-1900
21	T <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>3</sub>	9-10	1.5-2	1900-2000
22	T <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	9.5-11	2.5-3.5	1800-1900
23	T <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	11-12	3.5-4	1900-2000
24	T <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	12-13	4-5	2000-2100
25	T <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>1</sub>	10.5-12	1-1.5	1500-1600
26	T <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	12-13	1.5-2	1600-1700
27	T <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>3</sub>	13-14	2-2.5	1700-1800

Соответствие между входными характеристиками физической среды помещения и выходными параметрами регулирования описывается с помощью логических правил, представленных ниже:



Если  $T \in T_i$ ,  $W \in W_j$  и  $G \in G_z$  то  $P$  есть  $P_s$ ,  $Q$  есть  $Q_r$ ,

где:

$T_i$  – нечеткие данные по температуры;

$W_j$  – нечеткие данные по влажности;

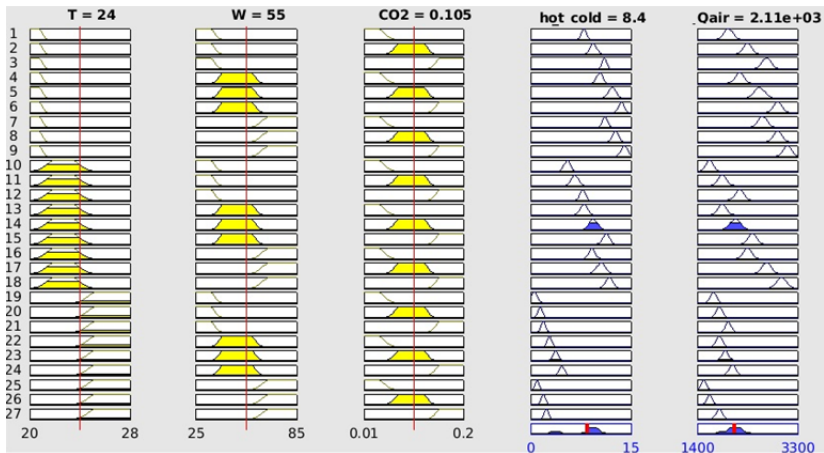
$G_z$  – нечеткие данные по содержания  $CO_2$  в воздухе;

$P_s$  – нечеткие данные по энергопроизводительность;

$Q_r$  – нечеткие данные по расходу воздуха;

$T, W, G, P, Q$  – значения температуры, влажности, содержания  $CO_2$ , энергопроизводительность, расход воздуха соответственно.

Правила функционирования нейронной сети представлены на рисунке 8. Правила включают логическую функцию «И», что указывает на необходимость выполнения сразу всех условий.



a)

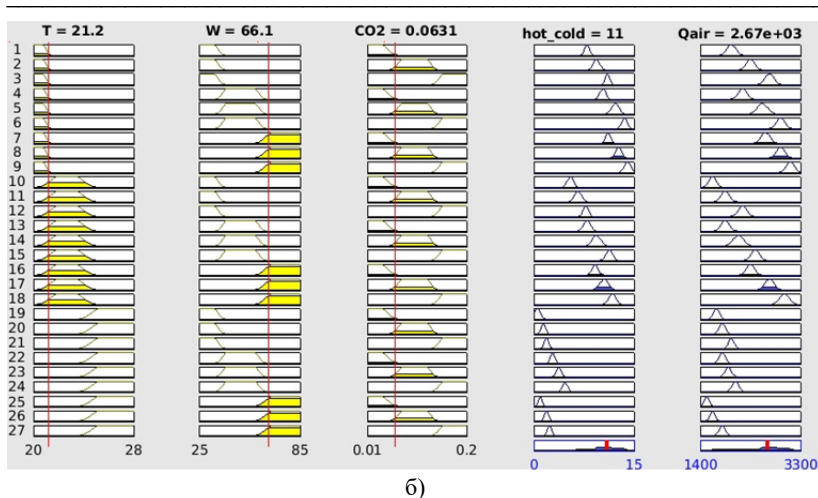


Рис. 8. Правила функционирования нейронной сети а) для входных параметров  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $W=55\%$ ,  $G=0.105\%$  б) для входных параметров  $T=21.2^{\circ}\text{C}$ ,  $W=66.1\%$ ,  $G=0.063\%$

**4.4. Выбор обобщенных рекомендованных режимов работы устройств климат-контроля.** На четвертом слое нейронная сеть устанавливает соответствие между входными параметрами физической среды помещения и рекомендованными режимами работы устройств климат-контроля. Для тестирования адекватности работы разработанного алгоритма управления устройствами микроклимата умного дома была написан программный код в среде Scilab Fuzzy Logic. С целью практической реализации алгоритм управления нейронной сети был перенесен в среду CoDeSys для программируемых логических контроллеров.

**5. Оценка качества работы нейронной сети для управления режимами работы системы кондиционирования умного дома.** Для оценки качества работы сети обученная нейронная сеть проверялась на способность к обобщению на данных контрольной выборки – 75 векторов что составляет 15% от обучающей выборки. Также проводилось тестирование сети по данным тестовой выборки - 150 векторов что составляет 30 % от обучающей выборки. Результаты, полученные на практике и при использовании нейронной сети сопоставлены на рисунке 9.

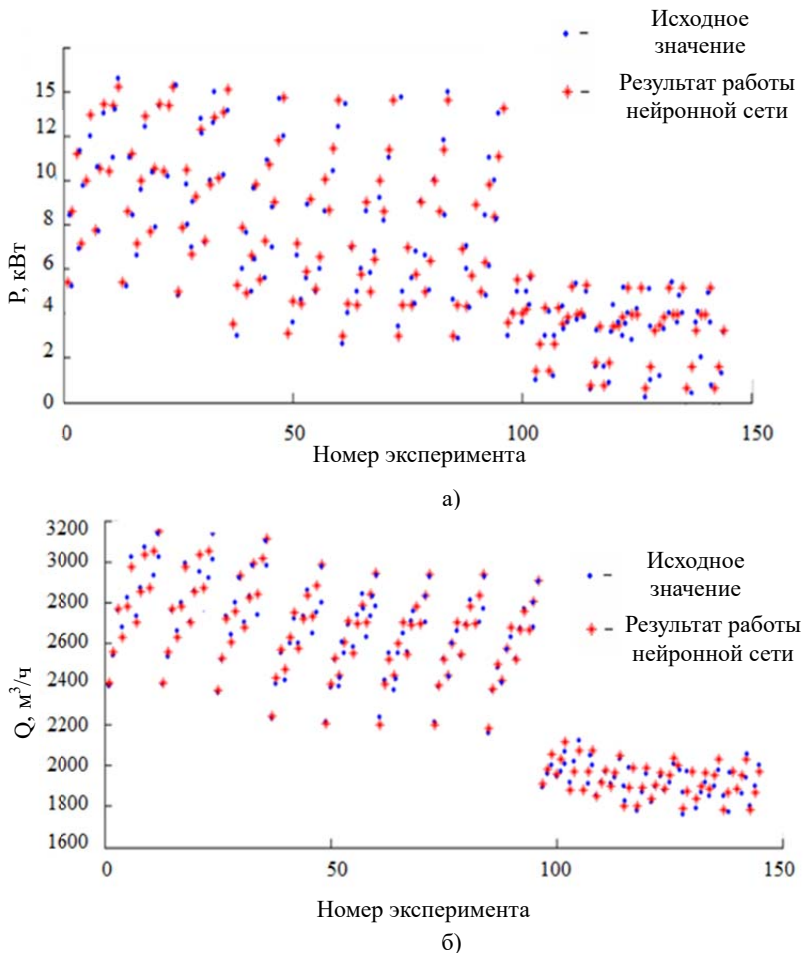


Рис. 9. Результат испытаний а)  $P$  - энергопроизводительность, б)  $Q$  - расход воздуха

По результатам тестирования нейронной сети видно, что присутствуют отклонения от реальных данных. Однако, они не носят существенного характера. Так, отклонение для параметра расход воздуха по абсолютной величине не превышают  $\pm 20 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а для параметра энергопроизводительность  $\pm 0.3 \text{ кВт}$ . В результате достоверность работы сети составила 0.95 и выше. Эксперимент указывает на преимущество использования гибридной структуры нейронной сети в сравне-

нии с классической, так как она в каждом случае активирует одну локальную нейронную сеть, в то время как классическая активирует всю сеть целиком. Это означает что быстродействие гибридной сети выше, при одинаковой точности. Также гибридная сети обладает гибкой системой переобучения. Так при переобучении сети достаточно адаптировать работу одной или нескольких локальных сетей, в то время как для классической сети приходится перестраивать всю архитектуру

**6. Моделирование работы нейронной сети для управления системой кондиционирования умного дома.** Рассмотрим, как изменяются в течение рабочего дня параметры физической среды в многофункциональном помещении университета. Замер параметров температуры, влажности и содержания  $\text{CO}_2$  производилась IoT датчиками, ретроспектива изменения параметров в течение рабочего дня представлена на рис. 10.

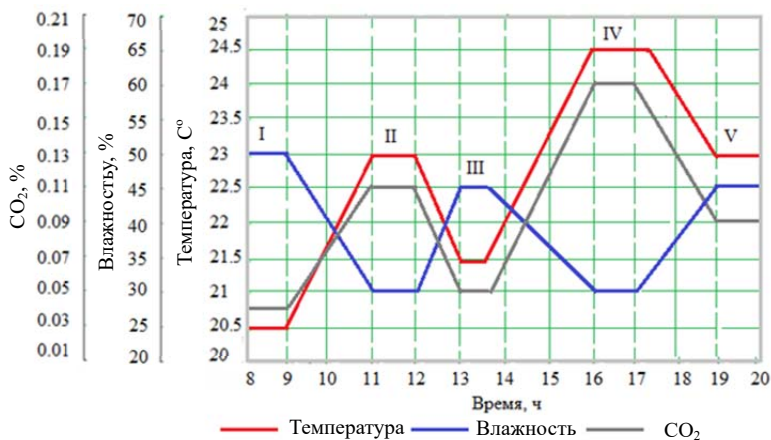


Рис. 10. Пример изменения параметров физической среды в помещении в течение рабочего дня

На рассматриваемом графике в промежутке времени с 8 по 20 часов выделены пять участков, на которых режимы работы устройств климат-контроля будут постоянными. Режимы работы между участками будут изменяться. Рассчитаем для каждого из пяти участков величину энергопроизводительности и расхода воздуха кондиционера. Рассмотрим порядок определения режимов работы кондиционера поэтапно на примере 2-го участка. На втором участке физическая среда помещения имеет температуру  $23\text{ C}^0$ , влажность  $30\%$  и содержание  $\text{CO}_2$  в воздухе  $0.11\%$ . Анализируя входные значения параметров физиче-

ской среды, система относит её состояние по температуре ко второй группе (рис. 5). По влажности к первой группе (рис. 6). По содержанию CO<sub>2</sub> ко второй группе (рис. 7). Степень принадлежности к той или иной группе окажет влияние на конечный результат.

В итоге для второго участка суточного графика состояния физической среды в помещении, с параметрами температуру 23 C<sup>0</sup>, влажность 30 % и содержание CO<sub>2</sub> в воздухе 0.11 %, рекомендованный режим работы для кондиционера будет соответствовать: по энергопроизводительности – 6.5 кВт, по расходу воздуха – 1880 м<sup>3</sup>/ч.

Для всех пяти участков рассматриваемого суточного графика аналогично рассчитываем рекомендованные режимы работы для кондиционера. Результаты по рекомендованным режимам работы кондиционера за рассмотренный промежуток времени при использовании нейронной сети представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные данные работы гибридной нейронной сети

номер участка	Параметры физической среды помещения			Обобщенные рекомендуемые режимы работы кондиционера		
	Температура, T	Влажность, W	Содержание CO <sub>2</sub> , G	Энергопроизводительность (лето), kw	Энергопроизводительность (зима), kw	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /h
I	20.5	50	0.04	2.5	9.9	2160
II	23	30	0.11	6.5	6.5	1880
III	21.5	45	0.05	8.25	8.25	1930
IV	24.5	30	0.17	4.37	3.8	2100
V	23	45	0.09	9.35	9.35	2120

Полученные результаты адаптированы к возможным диапазонам изменения режимов работы кондиционера и отражают полученные предыдущими исследователями тенденции изменения режимов работы кондиционеров различных конструкций и функций.

**7. Разработка методики управления микроклиматом умного дома на основе использования ансамбля искусственных нейронных сетей.** Для управления совместной работой систем кондиционирования, вентиляции и отопления рационально использовать ансамбли искусственных нейронных сетей. Особенностью управления совмест-

ной работой нескольких киберфизических устройств является наличие единого информационного центра согласования их взаимодействия. Расчет предиктивного управления микроклимата умного дома в едином информационном центре происходит посредством прогнозирования режимов совместной работы устройств микроклимата на заданный промежуток времени путем итерационного расчета параметров регулирования киберфизических устройств (кондиционера, вентиляции и отопления).

На рис. 11 представлена схема связи устройств микроклимата умного дома через единый информационный центр согласования режимов работы. Взаимодействие устройств через единый центр осуществляется по средствам двунаправленных связей. Единым центром согласования режимов работы устройств кондиционирования, вентиляции и отопления будет являться цифровая модель микроклимата физической среды помещения.

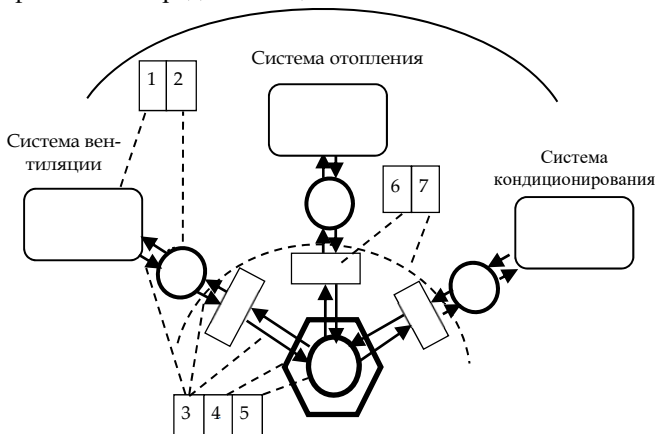


Рис. 11. Схема взаимодействия киберфизических устройств микроклимата умного дома, где 1 - устройства микроклимат; 2 – IoT датчики физической среды и регуляторы состояния физических устройств; 3- двунаправленные связи типа энергия – информация, информация–энергия, информация–информация; 4- единый информационный центр согласования режимов работы устройств, 5- блок управления режимами работы киберфизических устройств; 6 – блок фильтрации входной информации; 7 – граница физической и виртуальной среды

Экспериментальные исследования показали, что использование однотипных нейронных сетей для предиктивного управления дает ошибку прогнозирования состояния физической среды менее 5 % в 78% случаях [32]. Большой точности можно добиться, если объединить

разнотипные нейронные сети в единую систему. Поэтому для получения максимально возможной точности и универсальности был выбран способ построения системы прогнозирования параметров физической среды на основе ансамбля нейронных сетей. Структурная схема системы управления микроклиматом умного дома с использованием ансамбля нейронных сетей представлена на рисунке 12.

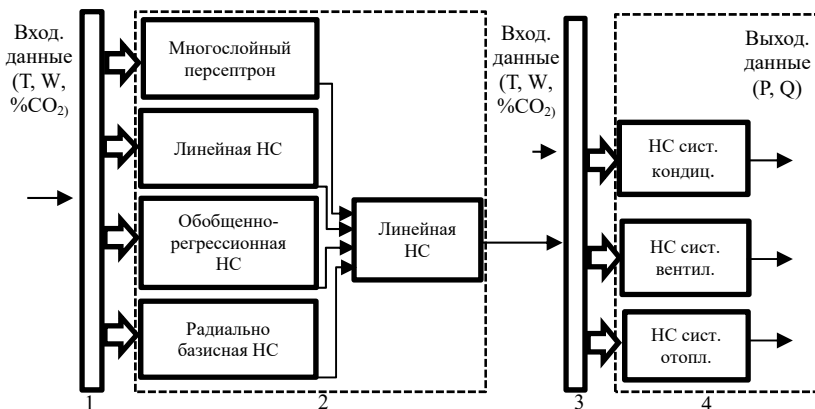


Рис. 12. Структурная схема системы управления микроклиматом умного дома с использованием ансамбля нейронных сетей, где 1 – блок консолидации данных о состоянии физической среды, 2 – блок прогнозирования состояния физической среды, 3 – блок обеспечения информационного взаимодействия киберфизических устройств, 4 – блок имитации режимов работы и выработки предиктивного управления устройствами климат-контроля

Представленная на рисунке 12 структура системы управления микроклиматом умного дома наглядно иллюстрирует разработанную методику управления устройствами климат-контроля в режиме реального времени. Состояние параметров физической среды в помещениях умного дома контролируются с помощью IoT датчики физической среды, расположенных в разных частях помещения. Информация о состоянии параметров физической среды поступает в блок консолидации, где производится фильтрация и подготовка данных для дальнейшей их обработки, а также в блок обеспечения информационного взаимодействия киберфизических устройств. После каждого изменения режима работы одного из киберфизических устройств система управления проводит прогнозирование состояния физической среды с целью выработки предиктивного управляющего воздействия на другие устройства для согласования их совместной работы. Таким образом, управляющий сигнал проходит цепочку взаимосвязанных устройств, в этом случае

для каждого из них определяет рациональный режим работы при минимальных затратах времени и энергии. Предиктивное управление микроклиматом умного дома производится путем рекурсивной процедуры сбора, анализа данных и выработки управляющих воздействий.

В среде Scilab был проведен анализ применимости различных нейронных сетей для решения задачи прогнозирования состояния физической среды умного дома. Нейронные сети, показавшие наибольшую эффективность, были использованы для формирования ансамбля нейронной сети. В ансамбль объединены следующие нейронные сети: многослойный персептрон, линейная, обобщенно-регрессионная и радиальная базисная сети. На вход этих сетей подаются одни и те же входные переменные о состоянии физической среды ( $T$ ,  $W$ ,  $\% \text{CO}_2$ ).

Ансамбли нейронных сетей имеют лучшее качество прогнозирования состояния физической среды, чем отдельные сети. Усреднение прогнозов по всем моделям сетей с различной структурой и обучение на основе различных множеств данных позволяет уменьшить дисперсию модели, не увеличивая её смещение. Это связано с тем, что при разных режимах работы устройств, и графиков изменения параметров физической среды более точные прогнозы дают различные виды нейронных сетей. При этом заранее неизвестно, какой вид сети будет давать наиболее точный прогноз. Поэтому каждая сеть обучается отдельно, а результирующий прогноз формируется как усредненная методом взвешенных наименьших квадратов величина. Для этого используется второй каскад, состоящий из линейной нейронной сети. На вход этой усредняющей сети подаются результаты прогнозов, полученных от отдельных нейронных сетей первого каскада.

**8. Практическая реализация системы управления микроклиматом умного дома.** Каждое устройство поддержки микроклимата помещения имеет уникальную цифровую модель, создающую взаимосвязь между реальным объектом, физической средой, IoT устройствами и его виртуальным аналогом. Также для каждого виртуального устройства разрабатывается нейронная сеть, создающая взаимосвязь контролируемых параметров физической среды и регулируемых величин исполнительных механизмов устройств климат-контроля. Взаимодействие реальных устройств, цифровых моделей, систем управления осуществляется через единый информационный центр согласования. Физически он представляет собой программируемый логический контроллер, а в качестве цифровой среды для реализации алгоритмов управления используется Scilab Fuzzy Logic и программная среда программируемых логических контроллеров CoDeSys. На рисунке 13 представлена схема интеграции модулей управления умным домом в



единое информационное пространство. Физически интеграция осуществляется по средствам интеграционной шины данных, а кибервзаимодействие осуществляется в цифровой среде проектирования на едином сервере сбора, обработки и хранения информации [33, 34].

При реализации на практике системы управления микроклиматом умного дома используются линейки промышленных IoT датчиков измеряющих в режиме реального времени температуру, влажность и содержание CO<sub>2</sub> в воздухе. Например, ПКГ100-CO<sub>2</sub> - промышленный датчик концентрации углекислого газа в воздухе и ПВТ100 - промышленный датчик влажности и температуры воздуха. Полученная информация фиксируется в нейронной сети контроллера, обрабатывается, а затем через команды управления передается на цифро-аналоговые преобразователи устройств управления или IoT регуляторы, которые управляют режимами их работы. В качестве управляющего микроконтроллера рекомендуется использовать ОВЕН ПЛК154 [35-37]. Для него в прогаммной среде CoDeSys реализован программный код алгоритма управления режимами работы устройств климат-контроля, в зависимости от параметров физической среды помещения: температуры, влажности и содержания CO<sub>2</sub> в воздухе.

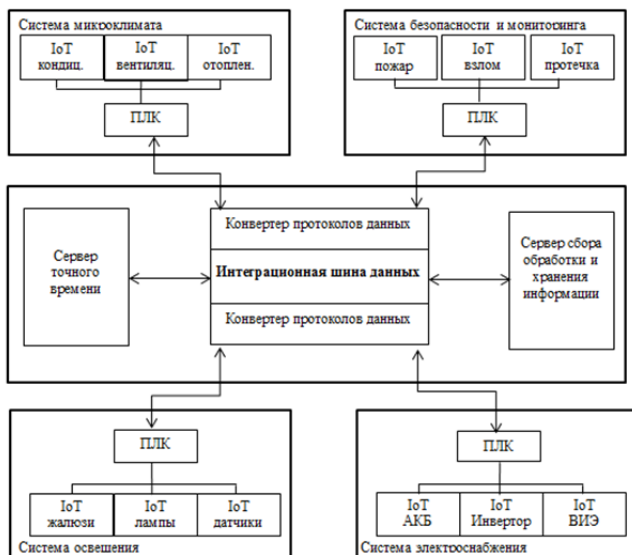


Рис. 13. Схема интеграции модулей управления умного дома в единое информационное пространство, где ПЛК-программируемый логический контроллер, АКБ – аккумуляторная батарея, ВИЭ – возобновляемый источник энергии, IoT – устройства с сетевыми интерфейсами взаимодействия (интернет вещей)

На рисунке 14 представлена функциональная схема информационного взаимодействия устройств климат-контроля многофункциональной аудитории и шкафа управления.

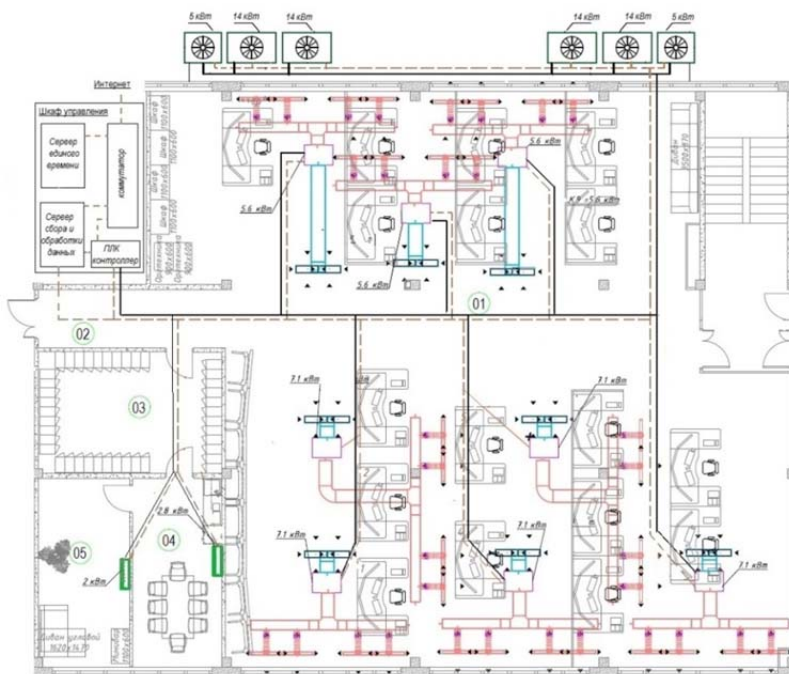


Рис. 14. Функциональная схема информационного взаимодействия шкафа управления и устройств климат-контроля, где сплошной линией обозначены цепи управления регуляторами устройств, а пунктирной цепи контроля состояния устройств

**9. Заключение.** Разработана методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей. Она реализована на примере управления устройствами климат-контроля умного дома путем прогнозирования параметров их функционирования.

Предлагаемая система управления микроклиматом в помещениях умного дома имеет ряд практических преимуществ, в сравнении с существующими узкоспециализированными решениями по домашней автоматизации. Во-первых, блок консолидации данных позволяет решить проблему массовой генерации данных, возникающей при некорректной работе цифровых датчиков и регуляторов умного дома по-

средством фильтрации входных данных и агрегации групп параметров. Во-вторых, блок информационного взаимодействия киберфизических устройств обеспечивает связь между устройствами климат-контроля, а также решает проблему установления скрытых взаимосвязей между их данными, путем поиска двунаправленных связей внутри компонентов и между ними. В-третьих, блок прогнозирования состояния физической среды и блок имитации режимов работы устройств климат-контроля позволяют осуществлять предиктивное управление с целью формирования рациональных режимов работы устройств при минимальных затратах времени и энергии.

Перечисленные технические преимущества системы управления микроклиматом умного дома на основе взаимодействующих киберфизических устройств экономят время и пропускную способность информационной сети, при этом уменьшается нагрузка на сервер управления, а значит и стоимость реализации системы. Использование итерационного процесса принятия управленческого решения в цифровой среде позволяет избежать ситуаций избыточного расхода энергии устройствами климат-контроля умного дома при их совместной работе. Единая цифровая среда моделирования сохраняет ресурс физических устройств, производя виртуальный расчет для всевозможных вариантов взаимодействия устройств между собой и физической средой. Целью управления на основе взаимодействующих киберфизических устройств является достижения минимума используемой мощности и информационного трафика при их совместной работе.

### Литература

1. Eungha Kim and Changsup Keum, Integrated community service platform system linked to smart home and smart city // 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Vienna, 2016. pp. 380-382. doi: 10.1109/ICUFN.2016.7537053.
2. Eungha Kim, Smart city service platform associated with smart home // 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, 2017. pp. 608-610. doi: 10.1109/ICOIN.2017.7899557.
3. Masera M., Bompard E.F., Profumo F., Hadjsaid N. Smart (electricity) grids for smart cities: assessing roles and societal impacts // Proceedings of the IEEE, 2018. Vol. 106. № 4. pp. 613-625. doi: 10.1109/JPROC.2018.2812212.
4. Cheng Z., Duan J., Chow M.-Y. To centralize or to distribute: that is the question: a comparison of advanced microgrid management systems // Industrial Electronics Magazine IEEE, 2018. vol. 12. № 1. pp. 6-24. doi: 10.1109 / IIE.2018.2789926.
5. Du Y., Hao T., Lukic S., Lubkeman D., Dubey A., Karsai G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications // Electronic Power Grid (eGrid) 2018 IEEE. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/eGRID.2018.8598696.
6. V. Govindraj, M. Sathiyarayanan and B. Abubakar, Customary homes to smart homes using Internet of Things (IoT) and mobile application // 2017 International

- Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), Bangalore, 2017. pp. 1059-1063. doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358532.
7. S.J. Clement, D.W. McKee, R. Romano, J. Xu, J.M. Lopez, D. Battersby, The Internet of Simulation: enabling agile model based systems engineering for cyber-physical systems // 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE), IEEE (2017). pp. 1-6. doi: 10.1109/SYSESE.2017.7994948.
  8. Y. Zhang, Y. Zhang, P. Ji, W. Xu, Z. Zhou, F. Tao. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey // *Int J Adv Manuf Technol* (2018). pp. 1-13. doi: 10.1016/j.jii.2017.08.001.
  9. Shvedenko, V.N., Mozokhin, A.E. Methodological Foundations for the Formation of Information Space and Digital Twin Objects in Smart Homes // *Autom. Doc. Math. Linguist.* 53, 303–308 (2019). doi: 10.3103/S0005105519060074.
  10. V.-H. Bui, A. Hussain, Y.-H. Im, and H.-M. Kim, An internal trading strategy for optimal energy management of combined cooling, heat and power in building microgrids // *Appl. Energy*. vol. 239. pp. 536-548. Apr. 2019.
  11. S. Huang, Y. Lin, V. Chinde, X. Ma, and J. Lian, Simulation-based performance evaluation of model predictive control for building energy systems // *Appl. Energy*. vol. 281, Jan. 2021, P. 116027.
  12. Álvarez, J. & Costa-Castelló, Ramon & Castilla, María del Mar. (2018). Repetitive Control to Improve Users' Thermal Comfort and Energy Efficiency in Buildings // *Energies*. 11(4): 976. doi: 10.3390/en11040976.
  13. Abhinandana, Boodi & Beddiar, Karim & Benamour, Malek & Amirat, Yassine & Benbouzid, Mohamed // (2018) Intelligent Systems for Building Energy and Occupant Comfort Optimization: A State of the Art Review and Recommendations. *Energies*. 11(10): 1-26. doi:10.3390/en11102604.
  14. Шведенко В.В., Мозохин А.Е. Методология организации полиструктурной системы обеспечения информационного взаимодействия и мониторинга процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электрической энергии // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 2 (60). С. 71-82.
  15. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 748–754. doi:10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754
  16. Z. Pezeshki and S.M. Mazinani, Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: A survey // *Artif. Intell. Rev.* vol. 52. no. 1. pp. 495-525, Jun. 2019.
  17. A. Esmaeilzadeh, M.R. Zakerzadeh, and A.Y. Koma, The comparison of some advanced control methods for energy optimization and comfort management in buildings // *Sustain. Cities Soc.* vol. 43. pp. 601-623. Nov. 2018.
  18. M. S. Ahmed, A. Mohamed, H. Shareef, R.Z. Homod, and J.A. Ali, Artificial neural network based controller for home energy management considering demand response events // in *Proc. Int. Conf. Adv. Electr., Electron. Syst. Eng. (ICAEEES)*. Nov. 2016. pp. 506-509.
  19. E. Isik and M. Inalli, Artificial neural networks and adaptive neurofuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey // *Energy*. vol. 154. pp. 7-16. Jul. 2018.
  20. A.Y. Abdelaziz and E.S. Ali, Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* vol. 73. pp. 632-643. Dec. 2015.

21. J.Wang, S. Li, H. Chen, Y. Yuan, and Y. Huang, Data-driven model predictive control for building climate control: Three case studies on different buildings // *Building Environ.* vol. 160. Aug. 2019. Art. no. 106204.
22. S. K. Howell, H. Wicaksono, B. Yuce, K. McGlinn, and Y. Rezgui, User centered neuro-fuzzy energy management through semantic-based optimization // *IEEE Trans. Cybern.* vol. 49. no. 9. pp. 3278-3292. Sep. 2019.
23. Лабинский А.Ю., Нефедьев С.А., Бардулин Е.Н. Использование нечеткой логики и нейронных сетей в системах автоматического управления // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России»*. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-nechetkoj-logiki-i-neuronnyh-setey-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения: 01.11.2021).
24. Parvin, Khadija & Hossain Lipu, M.S. & Hannan, M.A. & Abdullah, Majid & Ker, Pin Jern & Begum, Rawshan & Mansor, Muhamad & Muttaqi, Kashem & Mahlia, T. & Dong, Z.Y.. (2021). Intelligent Controllers and Optimization Algorithms for Building Energy Management Towards Achieving Sustainable Development: Challenges and Prospects // *IEEE Access.* no. 9. pp. 41577 - 41602. doi:10.1109/ACCESS.2021.3065087.
25. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети /В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – СПб.: Питер, 2003.
26. Анил К., Мао Д.-Д. Введение в искусственные нейронные сети. – Мичиган, США: Мичиганский гос. ун-т; Исследовательский центр IBM в Альмадене, США, 2006.
27. Яхьяева, Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие / Г.Э. Яхьяева. - М.: БИНОМ. ЛЗ, ИНТУИТ.РУ, 2012. - 316 с.
28. Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации: перев. с польского / С. Оссовский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
29. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" / Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 2. – М.: Минюст России, 2021. – 1142 с.
30. ГОСТ Р EN 13779-2007 Вентиляция для нежилых зданий. Требования к рабочим характеристикам для вентиляционных и кондиционерных комнатных систем. – М.: Минстрой России, 2007. – 43 с.
31. A. Garnier, J. Eynard, M. Caussanel, and S. Grieu, Predictive control of multizone heating, ventilation and air-conditioning systems in non-residential buildings // *Appl. Soft Comput.* vol. 37. pp. 847-862. Dec. 2015.
32. Z. Yong, Y. Li-Juan, Z. Qian, and S. Xiao-Yan, Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters // *J. Building Eng.* vol. 32. Nov. 2020. Art. no. 101505.
33. Мозохин А. Е., Цифровые платформы интеллектуальных сервисов / А.Е. Мозохин, Б.А. Староверов // *Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов РЕЛАВЭКСПО-2019.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 240–245.
34. Guozeng Feng, Shuya Lei, Xinxin Gu, Yuejiao Guo, Junyi Wang Predictive control model for variable air volume terminal valve opening based on backpropagation neural network // *Building and Environment*, 2020. ISSN 0360-1323. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107485
35. M. Ayani, M. Ganebäck, A.H.C. Ng Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Stockholm, May 16–18, 2018 (2018). pp. 243-248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139

36. Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.S. Lee Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // *Procedia Manuf*, 10 (2017). pp. 1031-1042. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
37. M. Macchi, I. Roda, E. Negri, L. Fumagalli Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management *IFAC-PapersOnLine*, 51 (2018). pp. 790-795. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.415

**Мозохин Андрей Евгеньевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника, отдел эксплуатации автоматизированных систем управления, филиал ПАО "МРСК Центра" - "Костромаэнерго". Область научных интересов: автоматизация технологических процессов и производств, информационные системы управления, интеллектуальная энергетика, умный дом, цифровые двойники. Число научных публикаций — 40. mozokhin@mail.ru; проспект Мира, 53, 156003, Кострома, Россия; р.т.: +7(953)641-27-11.

A. MOZOHIN  
**METHODOLOGY FOR ENSURING A COMFORTABLE  
MICROCLIMATE STATE IN A SMART HOME USING AN  
ENSEMBLE OF FUZZY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

*Mozohin A. Methodology for Ensuring a Comfortable Microclimate State in a Smart Home Using an Ensemble of Fuzzy Artificial Neural Networks.*

**Abstract.** Analysis of the application of smart home technology indicates an insufficient level of controllability of its infrastructure, which leads to excessive consumption of energy and information resources. The problem of managing the digital infrastructure of human living space, is associated with a large number of highly specialized solutions for home automation, which complicate the management process. Smart home is considered as a set of independent cyber-physical devices aimed at achieving its goal. For coordinated work of cyber-physical devices it is proposed to provide their joint work through a single information center. Simulation of device operation modes in a digital environment preserves the resource of physical devices by making a virtual calculation for all possible variants of interaction of devices between themselves and the physical environment. A methodology for controlling the microclimate of a smart home using an ensemble of fuzzy artificial neural networks is developed, with the example of joint use of air conditioning, ventilation and heating. The neural network algorithm allows you to monitor the parameters of the physical environment, predict the modes of cyber-physical devices and generate control signals for each of them, ensuring the joint operation of devices with minimal resource consumption and information traffic. A variant of practical implementation of a smart home climate control system on the example of a multifunctional educational computer class is proposed. Hybrid neural networks of air conditioning, ventilation and heating systems were developed. The testing of the microclimate control system of a multifunctional university classroom using hybrid neural networks was carried out, a programmable logic controller of domestic production was used as a control device. The goal of management based on cooperating cyber-physical devices is to achieve a minimum of power and information traffic when they work together.

**Keywords:** smart home, artificial neural network ensemble, climate control system, management system, cyber-physical devices.

**Mozohin Andrey** — Ph.D., Deputy head, Department of operation of automated control systems, Branch IDGC of Centre — Kostromaenergo. Research interests: automation of technological processes and productions, information management systems, smart energy, smart home, digital twins. The number of publications — 40. mozokhin@mail.ru; 53, Prospect Mira Str., 156003, Kostroma, Russia; office phone: +7(953)641-27-11.

### References

1. Eungha Kim and Changsup Keum, Integrated community service platform system linked to smart home and smart city // 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Vienna, 2016. pp. 380-382. doi: 10.1109/ICUFN.2016.7537053.
2. Eungha Kim, Smart city service platform associated with smart home // 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, 2017. pp. 608-610. doi: 10.1109/ICOIN.2017.7899557.

3. Masera M., Bompard E.F., Profumo F., Hadjsaid N. Smart (electricity) grids for smart cities: assessing roles and societal impacts // Proceedings of the IEEE, 2018. Vol. 106. № 4. pp. 613-625. doi: 10.1109/JPROC.2018.2812212.
4. Cheng Z., Duan J., Chow M-Y. To centralize or to distribute: that is the question: a comparison of advanced microgrid management systems // Industrial Electronics Magazine IEEE, 2018. vol. 12. № 1. pp. 6-24. doi: 10.1109 / MIE.2018.2789926.
5. Du Y., Hao T., Lukic S., Lubkeman D., Dubey A., Karsai G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications // Electronic Power Grid (eGrid) 2018 IEEE. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/eGRID.2018.8598696.
6. V. Govindraj, M. Sathiyarayanan and B. Abubakar, Customary homes to smart homes using Internet of Things (IoT) and mobile application // 2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), Bangalore, 2017. pp. 1059-1063. doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358532.
7. S.J. Clement, D.W. McKee, R. Romano, J. Xu, J.M. Lopez, D. Battersby, The Internet of Simulation: enabling agile model based systems engineering for cyber-physical systems // 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE), IEEE (2017). pp. 1-6. doi: 10.1109/SYBOSE.2017.7994948.
8. Y. Cheng, Y. Zhang, P. Ji, W. Xu, Z. Zhou, F. Tao. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey // Int J Adv Manuf Technol (2018). pp. 1-13. doi: 10.1016/j.jii.2017.08.001.
9. Shvedenko, V.N., Mozokhin, A.E. Methodological Foundations for the Formation of Information Space and Digital Twin Objects in Smart Homes // Autom. Doc. Math. Linguist. 53, 303–308 (2019). doi: 10.3103/S0005105519060074.
10. V.-H. Bui, A. Hussain, Y.-H. Im, and H.-M. Kim, An internal trading strategy for optimal energy management of combined cooling, heat and power in building microgrids // Appl. Energy. vol. 239. pp. 536-548. Apr. 2019.
11. S. Huang, Y. Lin, V. Chinde, X. Ma, and J. Lian, Simulation-based performance evaluation of model predictive control for building energy systems // Appl. Energy. vol. 281, Jan. 2021, P. 116027.
12. Álvarez, J. & Costa-Castelló, Ramon & Castilla, María del Mar. (2018). Repetitive Control to Improve Users' Thermal Comfort and Energy Efficiency in Buildings // Energies. 11(4): 976. doi: 10.3390/en11040976.
13. Abhinandana, Boodi & Beddiar, Karim & Benamour, Malek & Amirat, Yassine & Benbouzid, Mohamed // (2018) Intelligent Systems for Building Energy and Occupant Comfort Optimization: A State of the Art Review and Recommendations. Energies. 11(10): 1-26. doi:10.3390/en11102604.
14. Shvedenko V.V., Mozokhin A.E. Metodologiya organizacii polistrukturnoj sistemy obespecheniya informacionnogo vzaimodejstviya i monitoringa processov generacii, transporta, raspredeleniya i potrebleniya elektricheskoy energii // Informacionno-ekonomicheskije aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya. 2021. № 2 (60). S. 71-82
15. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. The concept of managing the network structure of intelligent devices in the digital transformation of the energy industry. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 748–754 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754
16. Z. Pezeshki and S.M. Mazinani, Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: A survey // Artif. Intell. Rev. vol. 52. no. 1. pp. 495-525, Jun. 2019.
17. A. Esmailzadeh, M.R. Zakerzadeh, and A.Y. Koma, The comparison of some advanced control methods for energy optimization and comfort management in buildings // Sustain. Cities Soc. vol. 43. pp. 601-623. Nov. 2018.



18. M.S. Ahmed, A. Mohamed, H. Shareef, R.Z. Homod, and J.A. Ali, Artificial neural network based controller for home energy management considering demand response events // in Proc. Int. Conf. Adv. Electr., Electron. Syst. Eng. (ICAEEES). Nov. 2016. pp. 506-509.
19. E. Isik and M. Inalli, Artificial neural networks and adaptive neurofuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey // *Energy*. vol. 154. pp. 7-16. Jul. 2018.
20. A.Y. Abdelaziz and E.S. Ali, Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* vol. 73. pp. 632-643. Dec. 2015.
21. J. Wang, S. Li, H. Chen, Y. Yuan, and Y. Huang, Data-driven model predictive control for building climate control: Three case studies on different buildings // *Building Environ.* vol. 160. Aug. 2019. Art. no. 106204.
22. S.K. Howell, H. Wicaksono, B. Yuce, K. McGlinn, and Y. Rezgui, User centered neuro-fuzzy energy management through semantic-based optimization // *IEEE Trans. Cybern.* vol. 49. no. 9. pp. 3278-3292. Sep. 2019.
23. Labinskij A.YU., Nefed'ev S.A., Bardulin E.N. Ispol'zovanie nechetkoj logiki i nejronnyh setej v sistemah avtomaticheskogo upravleniya // *Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii»*. 2019. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-nechetkoj-logiki-i-nejronnyh-setej-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения: 01.11.2021).
24. Parvin, Khadija & Hossain Lipu, M.S. & Hannan, M.A. & Abdullah, Majid & Ker, Pin Jern & Begum, Rawshan & Mansor, Muhammad & Muttaqi, Kashem & Mahlia, T. & Dong, Z.Y. (2021). Intelligent Controllers and Optimization Algorithms for Building Energy Management Towards Achieving Sustainable Development: Challenges and Prospects // *IEEE Access*. no. 9. pp. 41577 - 41602. doi:10.1109/ACCESS.2021.3065087.
25. Kruglov, V.V. Nechetkaya logika i iskusstvennye nejronnye seti [Tekst] /V.V. Kruglov, M.I. Dli, R.YU. Golunov. – SPb.: Piter, 2003.
26. Anil K., Mao D.-D. Vvedenie v iskusstvennye nejronnye seti. – Michigan, SSHA: Michiganskij gos. un-t; Issledovatel'skij centr IBM v Al'madene, SSHA, 2006.
27. YAh'yaeva, G.E. Nechetkie mnozhestva i nejronnye seti: Uchebnoe posobie / G.E. YAh'yaeva. - M.: BINOM. LZ, INTUIT.RU, 2012. - 316 s.
28. Ossovskij, S. Nejrionnye seti dlya obrabotki informacii: perev. s pol'skogo [Tekst] / S. Ossovskij. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 344 s.
29. SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya" [Tekst] / Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vrachaRF ot 28.01.2021 N 2. – M.: Minyust Rossii, 2021. – 1142 s.
30. GOST R EN 13779-2007 Ventilyaciya dlya nezhilyh zdaniy. Trebovaniya k rabochim karakteristikam dlya ventilyacionnyh i kondicionermyh komnatnyh sistem. – M.: Ministroy Rossii, 2007. – 43 s.
31. A. Garnier, J. Eynard, M. Caussanel, and S. Grieu, Predictive control of multizone heating, ventilation and air-conditioning systems in non-residential buildings // *Appl. Soft Comput.* vol. 37. pp. 847-862. Dec. 2015.
32. Z. Yong, Y. Li-Juan, Z. Qian, and S. Xiao-Yan, Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters // *J. Building Eng.* vol. 32. Nov. 2020. Art. no. 101505.
33. Mozokhin A.E., Cifrovye platformy intellektual'nyh servisov / A.E. Mozokhin, B.A. Staroverov // *Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodyh*

- specialistov RELAVEKSPO-2019. – CHEboksary: Izd-vo CHuvash. un-ta, 2019. – S. 240–245.
34. Guozeng Feng, Shuya Lei, Xinxin Gu, Yuejiao Guo, Junyi Wang. Predictive control model for variable air volume terminal valve opening based on backpropagation neural network // *Building and Environment*, 2020. ISSN 0360-1323. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107485
  35. M. Ayani, M. Ganebäck, A.H.C. Ng Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Stockholm, May 16–18, 2018 (2018). pp. 243-248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139
  36. Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.S. Lee. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // *Procedia Manuf*, 10 (2017). pp. 1031-1042. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
  37. M. Macchi, I. Roda, E. Negri, L. Fumagalli. Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management *IFAC-PapersOnLine*, 51 (2018). pp. 790-795. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.415

## Руководство для авторов

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Информатика и автоматизация» <http://ia.spcras.ru/>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных. Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше или LaTeX. Объем основного текста (до раздела Литература) - от 20 до 30 страниц включительно. Переносы разрешены. Номера страниц не проставляются. Основная часть текста статьи разбивается на разделы, среди которых являются обязательными: введение, хотя бы один «содержательный» раздел и заключение. Допускается также мотивированное содержанием и структурой материал а выделение подразделов. В основную часть опускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

## Author guidelines

Interaction between each potential author and the Editorial board is realized through the personal account on the website of the journal "Informatics and Automation" <http://ia.spcras.ru/>. At the registration the authors are requested to fill out all data fields in the proposed form. The submissions should be prepared using MS Word 2007, LaTeX. The text of the paper in the main part should not exceed 30 pages. Pages are not numbered; hyphenations are allowed. Certain figures, tables, listings and formulas are allowed in the main section, and their typography is considered in more detail at the journal web.

---

Signed to print 01.12.2021

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

---

The journal is registered in the Russian Federal Agency for Communications and Mass-Media Supervision, certificate ПИ № ФС77-79228 dated September 25, 2020  
Subscription Index П5513, Russian Post Catalog

---

Подписано к печати 01.12.2021. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 12,26. Заказ № 293.

Тираж 300 экз., цена свободная.

Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

---

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-79228 от 25 сентября 2020 г.

Подписной индекс П5513 по каталогу «Почта России»