

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 23

2022

№ 4

Издаётся с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:

БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.

ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.

ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:

АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН

БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН

ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН

ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН

КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН

КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН

КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН

ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН

РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН

СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН

СИГОВ А. С., акад. РАН

СОЙФЕР В. А., акад. РАН

СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН

ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН

ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН

ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН

ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН

ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция

GROUMPOS P. P., PhD, Греция

ISIDORI A., PhD, Италия

KATALINIC B., PhD, Австрия

LIN CH.-Y., PhD, Тайвань

MASON O. J., PhD, Ирландия

ORTEGA R. S., PhD, Франция

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США

STRZELECKI R. M., PhD, Польша

SUBUDHI B. D., PhD, Индия

АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан

ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.

ЖУКОВ И. А., д.т.н.

ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.

КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.

ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.

ЛОХИН В. М., д.т.н.

МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Sergeev S. F. Methodology of Evaluation of Evolving Sociotechnical Systems with Artificial Intelligence171

- Левоневский Д. К., Яковлев Р. Н., Савельев А. И. Модель децентрализованной киберфизической системы, устойчиво функционирующей в изменяющемся окружении177

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Пчелинцева И. Ю., Литовка Ю. В. Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токопроводящим экраном188

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Васильев С. Н., Галеев А. А., Залетин В. В., Кулаков К. С., Сильников М. В., Якушенко Е. И. Совместное использование мехатронных систем для организации эффективного противодействия скоординированному действию торпед противника197

- У Цюе, Рачков М. Ю. Расчет и оптимизация работы механизма реконфигурации колесно-гусеничного мобильного робота209

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА,
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Зубов Н. Е., Рябенко В. Н., Пролетарский А. В. Об одном подходе к синтезу робастной системы стабилизации продольного движения гипотетического самолета216

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 23

2022

No. 4

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

MAGOMEDOV M. Kh.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEYEV S. F.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and perspectives development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

Sergeev S. F. Methodology of Evaluation of Evolving Sociotechnical Systems with Artificial Intelligence 171

Levonevskiy D. K., Iakovlev R. N., Saveliev A. I. A Model of a Decentralized Cyber-Physical System Resiliently Functioning in a Changing Environment 177

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

Pchelintseva I. Yu., Litovka Yu. V. Automated Control System for the Process of Electroplating in a Bath with a Non-Conductive of Electric Current Screen 188

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Vassilyev S. N., Galyaev A. A., Zaletin V. V., Kulakov K. S., Silnikov M. V., Yakushenko E. I. Joint Use of Mechatronic Systems to Organize Effective Counteraction to the Coordinated Action of Enemy Torpedoes 197

Wu Que, Rachkov M. Yu. Calculation and Optimization of the Wheel-Track Mobile Robot Reconfiguration Mechanism 209

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

Zubov N. E., Ryabchenko V. N., Proletarsky A. V. On One Approach to the Synthesis of Robust Control of the Stabilization of the Hypothetical Aircraft Longitudinal Motion 216

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

S. F. Sergeev, sergeev_sf@spbstu.ru,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Sankt-Petersburg, 195251, Russian Federation

Corresponding author: **Sergeev Sergey F.**, Professor, Dr. of Psychology Sciences, Head of Scientific and Research Laboratory of "Ergonomics of Complex Systems", Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation,
e-mail: sergeev_sf@spbstu.ru

Accepted on December 03, 2021

Methodology of Evaluation of Evolving Sociotechnical Systems with Artificial Intelligence

Abstract

Evolution of the technogenic world, the development of networked and cyber-physical systems includes mechanisms of socio-environmental self-organization of techno-society through the transformation of human experience within the cycles of autopoietic self-organization of the techno-environment. An essential role in the issues of creating new forms of emerging socio-technical systems that include artificial intelligence technologies at the stages of formation and implementation of a technical project is played by the concept of including mechanisms of self-organization and system development, which is related to the methodology of assessing the ergonomic properties of the systems being created. Ergonomic assessment plays a unique harmonizing and corrective role in creating man-machine socio-technical systems. The determining role in the formation of ergonomic assessment of socio-technical systems is shown to be played by reduction mechanisms, which determine the evolution of these systems in the required direction. A socio-technical system with artificial intelligence does not have a priori predetermined, clearly known and intelligible to authors and user's properties, and displays them only in a working context, which does not allow applying the usual methods of ergonomic assessment used in assessing the permanent qualities of a socio-technical system concerning a human user. We noted the unique role of symbiotic relations in maintaining the effective operation of socio-technical systems with distributed artificial intelligence considered to the processes of coherence-decoherence, influencing the change of forms of organized complexity, and determining the system's viability in the environment. We pointed to the problem of inactivating technologically generated elements of the techno-environment into the socio-technical system's evolving part. Using the Internet as an example, we show that the free evolution of the techno-environment associated with excessive information diversity of the social component of the network leads to acceleration of its evolution but reduces its social stability and sustainability.

Keywords: sociotechnical system, artificial intelligence, self-organization, evolution, cycles of autopoietic embodiment, ergonomics, evaluation of social systems

For citation:

Sergeev S. F. Methodology of Evaluation of Evolving Sociotechnical Systems with Artificial Intelligence, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 171–176.

DOI: 10.17587/mau.23.171-176

УДК 004.5

DOI: 10.17587/mau.23.171-176

С. Ф. Сергеев, д-р психол. наук, проф., заведующий НИЛ, ssfpost@mail.ru,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Методология оценки эволюционирующих социотехнических систем с искусственным интеллектом

Эволюция техногенного мира, развитие сетевых и киберфизических систем включают механизмы социально-средовой самоорганизации технообщества за счет трансформации человеческого опыта в рамках циклов аутопоэтической самоорганизации техносреды. Важную роль в вопросах создания новых форм возникающих социотехнических систем, включающих технологии искусственного интеллекта на этапах формирования и реализации технического проекта, играет принятая разработчиками концепция включения механизмов самоорганизации и развития системы, связанная с методологией оценки эргономических свойств создаваемых систем. Эргономическая оценка играет особую гармонизирующую и корректирующую роль при создании человеко-машинных социотехнических систем. Показано определяющее значение в формировании эргономической оценки социотехнических систем механизмов редукции, которые определяют направление эволюции данных систем в требуемом направлении. Социотехническая система с искусственным интел-

лектом априорно не имеет заранее заданных, четко известных и понятных авторам и пользователям свойств, их она проявляет только в рабочем контексте, что не позволяет применять привычные методы эргономической оценки, используемые при оценке постоянных качеств социотехнической системы по отношению к человеку-пользователю.

Отмечена особая роль симбиотических отношений в поддержании эффективной работы социотехнических систем с распределенным искусственным интеллектом. Рассматриваются процессы когеренции-декогеренции, влияющие на смену форм организованной сложности, определяющие жизнеспособность системы в среде. Поставлена проблема энактизации порождаемых технологиями элементов техносреды в эволюционирующую часть социотехнической системы. На примере сети Интернет показано, что свободная эволюция техносреды, связанная с избыточным информационным многообразием социального компонента сети, ведет к ускорению ее эволюции, но снижает ее социальную устойчивость и стабильность.

Ключевые слова: социотехническая система, искусственный интеллект, самоорганизация, эволюция, циклы аутопоэтического воплощения, эргономика, оценка социальных систем

Introduction

The intensive formation and development of the technogenic environment of human civilization observed in recent decades is accompanied by an increase in the complexity of the technogenic environment, the development of technologies, gadgets, machines, and mechanisms that combine into network structures controlled by artificial intelligence technologies. These processes lead to developing a global evolving planetary techno-biological unity [1], which exhibits the properties of self-organization and self-development inherent in its system basis only on living organisms and social communication.

The primary mechanism causing the processes of global self-organization, development, and constitution of the new systemic essence of the technogenic civilization of Planet Earth is electronic communication, which forms virtual interfaces connecting users with artificial worlds of different degrees of virtuality [2].

Human users and artificial intelligent systems and agents, including mobile robots and "smart environments," become participants of social network communications. Hybrid and artificial socio-technical systems of evolving types are emerging.

The network complexity world is developing. Communication of observers, including artificial agents forming a digital dynamic copy of the world, plays a unique role in the logic of its functioning.

The probabilistic, quantum-like nature of interactions in the emerging techno-biotic environment of the self-organizing world includes mechanisms of coherence and decoherence, ensuring the emergence and collapse of complex forms of techno-environment organization. "Technologically, a human-dimensional network-centric scenario of anthropotechnosphere evolution is built" [3, p. 55]. There is a world of organized complexity, manifested in the intensive development and implementation of computer technologies of management and control in all spheres of human activity, including technologies of artificial intelligence and virtual reality. It can be said that the technogenic civilization is entering the post-natural stage of its development, characterized by increasing complexity and intellectualization of the environment, intersystem integration, and the

appearance of multilayer virtual control environments, in general digitalization and hybridization of real and virtual worlds.

In methodological terms, there is a change in the forms of thinking of researchers and designers of technogenic environment towards the application of forms of post-non-classical rationality [4], the main features of which in this context are:

- Socio-cultural determination of scientific and design activity;
- Formation of the designer-researcher in the process of learning and communication with other project participants;
- The emergence of heterogeneous, including different scientific specializations, research, and design communities;
- The design team's consideration as an evolving, self-organizing human-dimensional system within the current variant of technogenic culture.

Application of methodological principles of post-non-classical rationality is expedient in case of considering research and design objects as complex self-developing systems possessing cyclic causality, differentiation of external and internal space and time, taking into account the factor of system evolution and history within some cultural environment. Socio-technical systems with artificial intelligence arising within the evolving technogenic environment can be referred to as design objects.

Post-nonclassical methodology for the design of complex systems

The creation of complex systems is associated with the design of their composition and structure sufficient for the emergence of self-organization processes; but the methodology and tactics of research and conduct of the design process are changing. The active role of artificial intelligence technologies in solving design problems shifts the emphasis from the defining role of humans in the design of the technological environment to cooperative and mutually oriented communication interactions with the intelligent environment, which are carried out in computer-aided design systems. Virtual reality interfaces implementing induced environments are used. The designer's activity

in such a virtual environment, which simulates the design reality, allows effectively translating a person's creative abilities into a product. However, the design of complex systems differs from classical design.

Old mechanistic ideas about designing as the joint implementation of an engineering project execution algorithm that meets the technical assignment are replaced by holistic models and concepts.

They reflect the world's complexity in the process of autopoietic self-organization of the environment.

The development of cyber-physical technologies and flexibly networked machine design systems, the introduction of industrial robots, and automation tools bring new technological and production capabilities to create a complex technogenic environment. A distributed technological socio-technical environment emerges, generating an elemental diversity of components from which new machines and mechanisms are created.

The developer of a complex system cannot be outside the process of the evolution of the design environment. Submitting to its development logic, it gives the system the required properties, but it often does not understand the latent strategic goals and the direction of the development of the system being created. The designer is also not aware of the consequences of the future of the negative impact on a person the results of the functioning that arise from the self-organizing elements of the technosphere.

The use of symbiotic forms of interaction of the person and intellectual environment of designing [5] demands new approaches for the creation of effective socio-technical systems.

As a variant of human inclusion in the design processes, a number of authors suggest "imagination technologies," which are understood as methods that allow users to discuss potential socio-technical worlds from different points of view, imagining how the development of new technologies can affect their lives and the future of society as a whole [6, p. 233]. According to E. G. Grebenshchikova, socio-technical imaginaries play a unique role in designing the future — mental constructs constructing the present and future of science and technology, postulates the development of social technologies focused on a proactive approach, proactive management, openness to criticism, and active inclusion of social actors in the discussion of potential socio-technical worlds [7]. As applied to design activity, it is possible to speak about the emergence of a hybrid techno-cultural environment in the design organization, which determines the effectiveness of the project team activity.

Designing is local in space and distributed in time, simultaneously being additional to the world. The process of selective inactivation of the project through technology and production in the evolving technogenic environment, which may not be ready to introduce innovations containing potential danger for the human elements of the techno-social organism, is essential.

Sociotechnical Systems with Artificial Intelligence (Complex Sociotechnical Systems)

A unique role in creating socio-technical systems considered in this article is played by the issues of symbiotic mutually beneficial association of man and technology within the evolving techno-environment.

A socio-technical system is a dynamic self-organizing element of a hybrid technogenic environment, arising and developing due to interaction and communication between humans, technical infrastructure, and technology.

Eric Trist and Fred Emery, who worked as consultants at the Tavistock Institute of Human Relations [8], proposed this term in 1960.

Examples of such techno-social organisms are airports, energy, transport, and other systems that contain and implement computerized network forms of cyclic communication, in which the group activities of members of the labor collective are carried out.

Currently, socio-technical systems use artificial intelligence technologies to optimize intra-system processes by automating work with big data and typical procedures. Such systems can be called complex socio-technical systems. Two types of communication processes work synergistically: self-organizing communication in the human part of the system and information circulating in the machine part of the system. In their interaction, there may be problems of ensuring effective and comfortable human interaction with the self-organizing communicative techno-environment, the evolution, and autopoiesis, which can lead to the emergence of stressogenic and destructive states in users and actors.

Complex socio-technical systems should be considered in the concepts of multiplicity, dynamic diversity, non-linearity, non-uniformity, the complexity of self-organizing systems. The concept of complexity of self-organizing systems reflects the continuous dynamics of the world in all its fundamentally unknowable quantitative-qualitative manifestations. General intellect as a form of assessment of the capabilities of a complex system is its emergent property that allows the latter to effectively solve the problems of active (formation of the artificial environment, creative activity) and passive (adaptation, adaptation to the environment) existence in the world.

E. N. Knyazeva generalizes the existing views on complexity and complex systems, formulating and detailing the characteristic properties of complex systems within the framework of synergetic paradigm:

— Complexity is a multitude of system elements connected in a nontrivial way by original links. Complexity is a dynamic network of elements connected by definite rules;

— Complexity is the internal diversity of a system, the diversity of its elements or subsystems that makes it flexible and capable of changing its behavior depending on the changing situation;

— Complexity is a multilevel system (there is an architecture of complexity);

— Complex systems are open systems, i.e., exchanging substance, energy, and/or information with the environment. The boundaries of a complex system are sometimes difficult to define (seeing its boundaries depends on the observer's position);

— Complex systems are systems in which emergent phenomena (phenomena, properties) occur, which cannot be "subtracted" from analysis of the behavior of individual elements;

— Complex systems have a memory; they are characterized by the phenomenon of hysteresis, with a change in the mode of functioning processes being resumed on the old traces (previous tracks);

— Complex systems are regulated by feedback loops: negative, which ensures restoration of equilibrium, return to the previous state, and positive, which is responsible for rapid, self-stimulating growth, in the course of which complexity flourishes [9].

Obviously, the definitions given by E. N. Knyazeva's complex systems are also applicable to socio-technical intelligent systems. In this case, the intelligence embodied in the symbiotic form in the system is a function of the complexity of the self-organizing system.

Methodology for ergonomic assessment of complex socio-technical systems

A special harmonizing and corrective role in creating man-machine socio-technical systems is played by ergonomic evaluation, carried out in the process of ergonomic expertise, carried out at different stages of design and operation. This verifies the degree of implementation in a ergonomic requirements project that determines the quality and efficiency of man-machine interaction in the system. However, the use of this procedure in a socio-technical system with artificial intelligence is complicated because it does not have a priori predetermined, is clearly known, and is understandable to authors and users properties. They manifest themselves only in a working context, which prevents the application of the usual ergonomic assessment methods used in assessing the permanent qualities of a socio-technical system concerning a human user. They can change continuously at different stages of the socio-technical system's existence and manifest themselves only in forms accessible to interpretation by the observer.

Only a human expert, including elements of creativity, aesthetics, group and individual professional experience, and at the same time subjectivity and randomness, carries out being a complex interdisciplinary procedure, ergonomic assessment.

In essence, any subjective evaluation, created by man, is an attempt of reduction of his experience,

the essence and form of reality reduction performed by consciousness within the limits of subjective reality (which itself is a form of reduction performed by consciousness, while objective evaluation is a result of processed data reduction in the information system. Both assessments are forms of statistical evaluation, data processing, and optimization.

Evaluation is always associated with measurement and interpretation. The latter reflects the designer's dynamic picture of the world and is mainly subjective. Attempts to automate the processes of interpretation formation with the help of artificial intelligence algorithms rely on big data processing and deep learning technologies [10]. However, the replacement of natural intelligence by its technical counterpart artificial intelligence is currently impossible due to the difference in their nature — active but probabilistic in humans and passive, but deterministic in a computer system despite their fundamentally joint information base [11]. V. A. Lectorsky holds a similar position and view, supplementing them with the notion of postclassical logic derived from the process of metaphysics, which proceeds from the fact that things and other objects can and should be understood as a kind of clots of processes [12].

When evaluating something, people traditionally try to implement the principle of objectivity, which requires excluding the subject from any evaluation process because the latter does not allow to formalize evaluation and leads to its division into external objective and internal — subjective. At the same time, measurement and evaluation are always a process of reduction carried out by an observer, in which we understand something and someone (including a person) making a distinction. In essence, evaluation is the simplest model of the system being evaluated. Generating models of the world is the primary function of consciousness, which tries to create and verify the most effective and minimal models of reality [13].

Mathematical modeling is most often used in design as a discipline that works with models derived from formalizing the results of reduction, but the intuition and experience of the designer play a considerable role. In socio-technical systems, there are processes of reducing the system's world into evaluations, which participate and are used to create directions and forms of their further evolution. Each new state of a socio-technical system is also the result of a continuous reduction of its past states into simple models and then evaluations. The reduction-evaluation-correction cycles are fundamental for all socio-technical systems.

Observation plays a decisive role in evaluation procedures (local reductions) and is connected with the emergence of a system of distinguishing (observer) and systems of processing and interpreting data, transforming them into comprehensible (inconsistently interpreted) results. The observer plus the memory interpreter form a subject. Being a subject, an observer of the future, the designer always

deals with reduced forms of the world represented in his subjective world. His task is to make a distinction, which is always a reduction. In this case, the quantum holistic nature of the world comes into contradiction with concrete results of the reality world represented in consciousness. Resolution of this contradiction is possible only within social relations and social evaluations formed in them.

Social evaluation is some integrity composed of, but not reducible only to, reduced evaluations of collective members. Due to the autopoietic and probabilistic-random nature of emergent social interactions in the collective, a social system cannot be reduced to an object because any description would be incomplete and represent some interpretation, which is always inherently inherent a reduction of the actual social system. Multiple evaluations in a nonlinear sum of unit reductions lead to confusion and restoration of interpretation as wholeness, which again becomes quasi-quantum-mechanical.

Thus, design is the process of constructing some wholeness from local reductions created by designers based on evaluations obtained in collaborative work. The project is the reduced part of the future growing out of the past. Implementation is the process of transforming the project into reality. The result is the local realization of the project, which has acquired the force of reality. Subjective reduction transforms the project into reality and vice versa.

According to V. P. Zinchenko, a genome of spiritual development arises, which cyclically combines and complements the real and ideal forms of reality, forming a spiral of evolution [14, p. 338]. The subject and technology are a tool and mechanisms for transforming the reduced subjective forms of consciousness into reality.

Designing is creating a product with given properties and multiple evaluations of its impact on the world as a whole. Anything, in reality, is infinitely more diverse than its design. It is an evolving complexity, growing from an ideal form in the minds of the project's authors and realized in a variety of technological and social relations and forms into a real product.

In 1972 Austin O. Roche, Phil Ray, and John Frassanito were granted Patent No. 224,415 for the Datapoint 2200 desktop personal computer, making them the first personal computer [15]. They had no idea how effective technology they had released into the world, how significant the consequences of what they had done for the progress of humanity would be. The consequence of this was the total computerization of all spheres of human existence and activity and the independence of the technical environment itself from man. There appeared cyber-physical systems based on evolutionary principles of development [16], including key characteristics:

- Independence of functioning of system components;

- Managerial independence of the system components;

- Geographic distribution;

- Evolving behavior;

- Evolving development processes.

Technology has gained the ability to replicate human information behavior, create a digital picture of the world, and change it. This picture may be unfriendly and dangerous for humans, but at the same time, it may help ensure effective technosymbiosis in socio-technical systems.

Mechanisms of self-organization of evaluation activity in socio-technical systems with artificial intelligence

The design of complex computer and communication networks and environments requires an examination of the impact of global effects of changes occurring in the technogenic environment, especially in its interface elements that provide inter-system relationships and integration of humans into the technobiotic environment [17].

Let us note the dynamic nature of the development of human-dimensional systems whose very existence is a continuous change of the environment in the process of which there is a continuous entanglement of macroscopic systems and the disintegration of systems of interactions. Mechanisms that form the system and its environment in the form of a superposition of macrosystems — coherence process and destroy its entangled state — decoherence processes, as a result of which classical interaction systems appear before the observer [18]. The entangled states create the subtle matter of the real world, and the reduction leads to the definite classical world. At the same time, only creativity in the broad sense of the word integrating different points of view on the evolution of a complex system can overcome the deadening force of reductionism preventing the development of the formed version of the complex world.

We must admit that effective ergonomic assessment of socio-technical systems is possible only with multidimensional analysis, which includes multiple perspectives on the system from internal and external observers, allowing us to give an objective forecast of the system's development. This is possible with the emergence of a process of self-organization in the evaluation mechanism during the creation and functioning during the operation of the socio-technical system.

Self-organization in the formation of assessments in socio-technical systems

A number of conditions in the evaluation mechanisms and multiple feedbacks are necessary for the

inclusion of self-organization mechanisms in an open socio-technical system:

— Multiple diversity of elements of the evaluation system being at the first stage of its development under disorganization, weak mutual connectivity;

— Non-equilibrium, leading to the system deviations from the thermodynamic equilibrium of the evaluation system;

— Non-linearity and instability of relations and states between elements of the system lead to multiple variants of its development, the appearance of new forms with insignificant changes in parameters.

The inclusion of artificial intelligence algorithms in the work of the socio-technical system allows reducing the diversity of its final structures and optimizing the possible variants of development and resource provision.

Conclusion

The modern view of socio-technical systems with artificial intelligence considers them as complex self-organizing elements of the developing technogenic environment. The primary mechanism of their emergence and evolution is connected with the processes of coherence — decoherence of the guided processes of self-organization of technogenic environments with the active influence of the human link and the system of evaluations generated by the technical part, optimizing the structure and functions of the system. The emergence of multiple evaluations of the external and internal state of the socio-technical system leads to possible forms of its realization and evolution. Evaluation can be considered as a form of reduction of actual and potential states of the system within the framework of post-nonclassical rationality describing self-developing systems.

The system's computer (technogenic) world generates local digital reductions composed of external observations of the system. They are subject to formal laws and, as such, acquire the property of computability and, consequently, can be realized in digital form. The total digitalization of socio-technical systems attempts to use the reductions of the real, holistic world to organize them. Diversity, stability, and stability of the flow of self-organization processes in socio-technical systems with artificial intelligence give social communications and choice of development directions by symbiotic interactions between artificial and natural intelligence.

An example of a global socio-technical system is the Internet. In the process of its evolution, turning into a dynamic digital copy of the real world leads to its destruction because it is incapable of managing the future, which is peculiar only to active systems involving humans. It is necessary to take a cautious approach to the total digitalization of society because the multiple assessments arising in

the environment lead to the appearance of destructive copies of the world outwardly indistinguishable from reality, but leading to the destruction of the social mechanisms of self-organization of society. The dominance of artificial intelligence distributed in the Internet environment leads to the degradation of human society and the displacement of a person losing moral and ethical reference points from productive and creative activity.

References

1. **Sergeev S. F.** Science and technology of the XXI century. Communications and NBICS-convergence, *Global Future 2045. Convergent Technologies (NBICS) and transhumanistic evolution*, Ed. Prof. D. I. Dubrovsky, Moscow IBA Publishing House LLC, 2013, pp. 158—168 (in Russian).
2. **Sergeev S. F.** Reflexive autoevolution of global intelligent technogenic environments, *Reflexive processes and management. Collection of materials of the IX International Symposium on October 17—18, 2013, Moscow*, Ed. V. E. Lepsky, Moscow, Kogito-Center, pp. 245—248 (in Russian).
3. **Arshinov V. I., Budanov V. G.** The concept of a network in optics of a paradigm of synergetic complexity, *Questions of philosophy*, 2018, no. 3, pp. 49—58 (in Russian).
4. **Stepin V. S.** Classics, non-classics, post-non-classics: criteria of distinction, *Postnonclassics: philosophy, science, culture*, St. Petersburg, Mriya, 2009, pp. 249—295 (in Russian).
5. **Sergeev S. F.** Intellectual symbionts in ergatic systems, *Scientific and Technical Bulletin of information technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 2 (84), pp. 149—154 (in Russian).
6. **Felt U., Schumann S., Schwarz C. G., Strassnig M.** Technology of Imagination: A Card-Based Public Engagement Method for Debating Emerging Technologies, *Qualitative Research*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 233—251.
7. **Grebenshchikova E. G.** Sociotechnical imaginations of techno science, *Questions of philosophy*, 2018, no. 3, pp. 59—67 (in Russian).
8. **Emery F., Trist E.** The Causal Texture of Organizational Environments, *The Social Engagement of Social Science, a Tavistock Anthology*, vol. 3: A Tavistock Anthology-The Socio-Ecological Perspective, Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 2016, pp. 53—65.
9. **Knyazeva E. N.** Temporal architecture of complexity, *Synergetic paradigm. "Synergetics of innovative complexity"*, Moscow, Progress-Tradition, 2011, pp. 66—86 (in Russian).
10. **Allen J. F.** In Silico Veritas. Data-Mining and Automated Discovery: The Truth Is in There, *EMBO Reports*, 2001, no. 2, pp. 542—544.
11. **Dubrovsky D. I.** The task of creating a general artificial intelligence and the problem of consciousness, *Philosophical Sciences*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 13—44 (in Russian).
12. **Lektorsky V. A.** Commentary on L. Garai's article "Complementarity of information theory and identity theory in human sciences", *Questions of Philosophy*, 2019, no. 5, pp. 124—127 (in Russian).
13. **Dubrovsky D. I.** Consciousness brain, artificial intelligence, Moscow, Strategy Center, 2007 (in Russian).
14. **Munipov V. M., Zinchenko V. P.** Ergonomics: human-oriented design of equipment, software and environment, Moscow, Logos, 2001 (in Russian).
15. **Lamont** Wood Datapoint. The Lost Story of the Texans Who Invented the Personal Computer Revolution, Hugo House Publishers, Ltd, 2010.
16. **Maier M. W.** Architecting Principles for System-of-Systems, *Systems Engineering*, 1998, no. 4, vol. 1, pp. 267—284.
17. **Sergeev S. F.** The human factor in the evolution of the technogenic world, *Automation. Computer science*, 2016, no. 2 (39), pp. 39—44 (in Russian).
18. **Joos E., Zeh H. D., Kiefer C., Giulini D., Kupsch J., Stamatescu I. O.** Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory, Springer, Heidelberg, 2003.

Д. К. Левоневский, канд. тех. наук, ст. науч. сотр., руководитель лаборатории, levonevskij.d@iiias.spb.su,
Р. Н. Яковлев, магистр, мл. науч. сотр., iakovlev.r@mail.ru,
А. И. Савельев, канд. тех. наук, ст. науч. сотр., руководитель лаборатории, saveliev@iiias.spb.su,
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Модель децентрализованной киберфизической системы, устойчиво функционирующей в изменяющемся окружении*

Рассматриваются вопросы децентрализации и динамического перераспределения ролей в киберфизических системах (КФС), предназначенных для работы в изменяющемся окружении и, в особенности, в открытых пространствах, где существуют повышенные риски поломки модулей и потери связи. В частности, исследуются методы децентрализации алгоритмов управления поведением КФС и обеспечения избыточности их компонентов и связей. Выявлен ряд требований к подобным системам и отмечено, какие ограничения в существующих подходах препятствуют реализации систем, удовлетворяющих этим требованиям, на физическом, сетевом и прикладном уровнях. Для каждого уровня предложены модели поведения КФС, которые обеспечивают автономное распределение инфраструктурных ролей между компонентами. Выполнено формальное описание этих моделей с помощью диаграмм деятельности. Это позволило выполнить синтез структурно-параметрической модели автономной мобильной КФС, ориентированной на функционирование на открытых территориях в условиях динамического окружения и решение прикладных задач, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов. Модель отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах и учитывает аспекты устойчивости системы и ее реакции на деструктивные воздействия. К преимуществам предложенных моделей относятся децентрализация задач, отсутствие центральных, критических узлов и узких мест, отсутствие требований прямой видимости между устройствами, малого расстояния между ними, стационарности устройств, возможность работы в неисследованном окружении. Разрабатываемые решения ориентированы на применение, прежде всего, в сфере бизнеса и пригодны для использования, к примеру, на промышленных предприятиях, оснащенных мобильными робототехническими устройствами с камерами, при обработке сельскохозяйственных угодий и т. д. Другой сферой применения является выполнение территориальных исследований, спасательных операций. Применение программно-аппаратных комплексов, реализующих предложенный подход, позволит более точно выполнять изучение местности, в том числе неисследованных территорий с ограниченной доступностью для человека.

Ключевые слова: киберфизические системы, роботы, архитектура КФС, распределенные системы, децентрализованные системы, устойчивость, надежность

Введение

Функционирование киберфизической системы (КФС) в динамической среде сопряжено с повышенными рисками выхода из строя ее компонентов, потери связи между ними и сложностей в навигации. Централизованные подходы к построению КФС при относительной простоте и удобстве в управлении имеют ряд недостатков — в частности, ограниченную масштабируемость, наличие узких мест, угрозы нарушения связности, а также проблемы с доступностью на больших пространствах [1]. Таким образом, имеется необходимость создания устойчивых, связных, децентрализованных КФС с возможностью динамического подключения и отключения их компонентов. В данной работе рассматриваются вопросы повышения надежности КФС, функционирующих в открытом пространстве и динамическом окружении. В частности, исследуются методы

децентрализации алгоритмов управления поведением КФС и обеспечения избыточности их компонентов и связей.

Состояние исследований

Рассмотрим современное состояние исследований в области самоорганизации КФС при отказе отдельных узлов или компонентов. В контексте рассматриваемой проблемы наиболее актуально изучение инцидентов, связанных с влиянием окружающей среды, ведущих к потере связности системы. Исследуем известные подходы к построению КФС, устойчивой к таким инцидентам, и проведем анализ соответствия известных решений требованиям к КФС, функционирующим в открытых пространствах.

Рассмотрим подходы к построению КФС, снижающие вероятность возникновения этих инцидентов. Для классификации подходов удобно рассматривать их в соответствии с уровнями модели ISO/OSI [2], которая содержит семь уровней, на практике они часто группи-

*Исследование выполнено при поддержке РНФ № 20-79-10325.

руются. Целесообразно выполнить эту группировку по характеру задач, которые решаются для повышения надежности таких систем. Те решения, которые ограничиваются способами передачи данных по каналам связи или организацией этих каналов, относятся к физическому и каналному уровням. К сетевому, транспортному, сеансовому уровням относятся решения, основанные на маршрутизации и создании оверлейных сетей и виртуальных каналов связи. Решения, учитывающие прикладные задачи КФС, отнесены к прикладному уровню и уровню представления. Рассмотрим эти уровни подробнее.

На физическом и канальном уровнях известен ряд решений на основе протокола LoRaWAN и его аналогов, позволяющих повысить дальность и эффективность коммуникации между узлами КФС. Так, в работе [3] представлена оценка эффективности беспроводных сетей LoRa, проанализировано влияние параметров ToA (Time on Air), битрейт и фактор распространения (SF) на уровень производительности. В статье [4] рассмотрена беспроводная сенсорная сеть (WSN), смоделированная в симуляторе Castalia с использованием технологии Long Range (LoRa), показаны зависимости коэффициента потери от параметров системы и среды. В работе [5] изучается возможность использования LPWAN в сельских районах. Благодаря симуляциям оценивается производительность LoRaWAN, которая является одной из основных доступных технологий LPWA с точки зрения показателей производительности сети, таких как диапазон, охват, время ожидания и коэффициент доставки пакетов.

При том, что ряд приведенных решений позволяет расширить зону связности и повысить надежность обмена данными, очевидно, что они не предоставляют исчерпывающих возможностей обеспечения связности КФС на больших пространствах. Кроме того, эти решения не рассматривают случаи, когда среда, содержащая препятствия для сигнала, не исследована и изменчива.

На сетевом, транспортном, сеансовом уровнях известны решения, позволяющие улучшить связность КФС, распределив функции передачи данных между узлами и обеспечив маршрутизацию. Такие решения позволяют выполнять самоорганизацию КФС на сетевом, транспортном, сеансовом уровнях и обычно основаны на подходе WSN, использовании

mesh-сетей и установлении многопереходных соединений. Так, в работе [6] рассматривается система передачи данных для перемещающихся военных мобильных групп. Описанная mesh-сеть позволяет действовать узлам независимо друг от друга для приема и передачи данных. В статье [7] предложен подход к организации связи, в которой каждый агент в системе может покинуть сеть или принять новые соединения, и для этого разработаны четыре специальных протокола. В работе [8] проведен обширный обзор протоколов маршрутизации Flying Ad-hoc (FANET), где подробно описаны стратегии и методы маршрутизации. Примером использования FANET может служить работа [9], где предложен подход к самоорганизации групп беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), основанный на поведении роя светлячков. Тем не менее, способ предполагает использование для части задач центрального узла — станции управления.

Подходы к децентрализации на сеансовом уровне состоят, как правило, в создании логической (оверлейной) сети поверх существующей физической. Оверлейные сети абстрагируются от нижележащих протоколов, и сеть может использовать различную среду передачи данных в разных сегментах гетерогенной сети. Узлы в каждый момент времени поддерживают избыточное число соединений (сеансов), резервируя каналы передачи данных. Оверлейные сети могут быть управляемыми, где каждому узлу сети известны все узлы сети и их возможности, и неуправляемыми, где ни одному из узлов не известна полная топология сети [10]. Пример рассматривается в работе [11], основная идея которой — построить топологию логического дерева поверх физической сети, сформированной роботами. Ограничение состоит в том, что метод рассчитан только на стационарные устройства.

Приведенные подходы существенно повышают связность КФС. Они позволяют динамически перестраивать маршруты передачи данных при подключении и отключении узлов КФС, но не предлагают решений для ситуации, когда маршрут невозможно построить (к примеру, на местности, где невозможно развернуть узлы-передатчики с достаточной плотностью). К тому же, сетевой и транспортный уровни не затрагивают проблему перераспределения прикладных задач и ролей узлов. Для этого необходимы решения, учитывающие прикладной уровень функционирования КФС.

На прикладном уровне учитываются роли и прикладные задачи КФС, а существующие подходы позволяют перераспределять эти роли и задачи и управлять ими. Примером являются мобильные КФС, подробный обзор которых приведен в работе [12], где рассмотрены основные исследовательские задачи мобильных КФС, касающиеся безопасности, энергопотребления, динамического окружения и обеспечения стабильности системы. Краткое изложение существующих децентрализованных архитектур систем управления в промышленности приводится в работе [13]. Авторы указывают на различия между традиционной централизованной и иерархической архитектурами по сравнению с архитектурой децентрализованных КФС. В статье [14] обсуждается подход к адаптируемым производственным КФС, основанный на контейнерных технологиях. В работе [15] предложен децентрализованный алгоритм координации компонентов производственных КФС, который в среднем на 50 % превосходит альтернативные централизованные алгоритмы по показателям пропускной способности, скорости работы и задержки, но применим лишь ограниченно, так как требует известного и статического окружения, а децентрализация распространяется лишь на отдельные задачи КФС. Таким образом, при использовании представленных подходов, как правило, остается потребность в критических стационарных узлах управления и сбора данных, что не всегда может быть обеспечено на открытых территориях с изменчивой средой.

Таким образом, при наличии множества отдельных разработок отсутствует исчерпывающий подход, в рамках которого возможно построение устойчивых КФС, функционирующих на открытых территориях в динамической среде. На основе проведенного анализа можно сформировать предложения по организации КФС с высоким уровнем связности. Так, следует:

- использовать несколько видов типовых многоцелевых взаимозаменяемых узлов;
- выделять роли, доступные каждому виду узлов, и реализовывать алгоритмы их динамического назначения;
- избегать наличия незаменимых (критических) узлов КФС;
- обеспечить избыточность узлов КФС каждого вида;
- использовать оборудование, обладающее достаточным для исследуемой местности уровнем

защиты от воздействия окружающей среды (влаги, пыли, температур);

- поддерживать актуальные данные о территории, что включает в себя как предварительный сбор данных, так и переобучение КФС в процессе работы.

Модели поведения КФС

Рассмотрим модели поведения КФС на разных уровнях, которые обеспечивают автономное распределение инфраструктурных ролей между компонентами системы. На физическом и канальном уровнях отказом является потеря соединения узла с каналом связи по внешним (потеря сигнала от роутера) или внутренним причинам. Внутренние причины могут быть связаны со сбоем сетевого оборудования или с состоянием узла, установившимся вследствие его поведения (например, если узел покинул зону досягаемости роутера). Сценарии работы на этом уровне зависят от технологий связи. При высокой плотности расположения ретрансляторов применимы Wi-Fi-сети, для больших расстояний широко используется LoRaWan. В любом случае действия узла должны быть направлены на восстановление связи, и соответствующая диаграмма деятельности изображена на рис. 1.

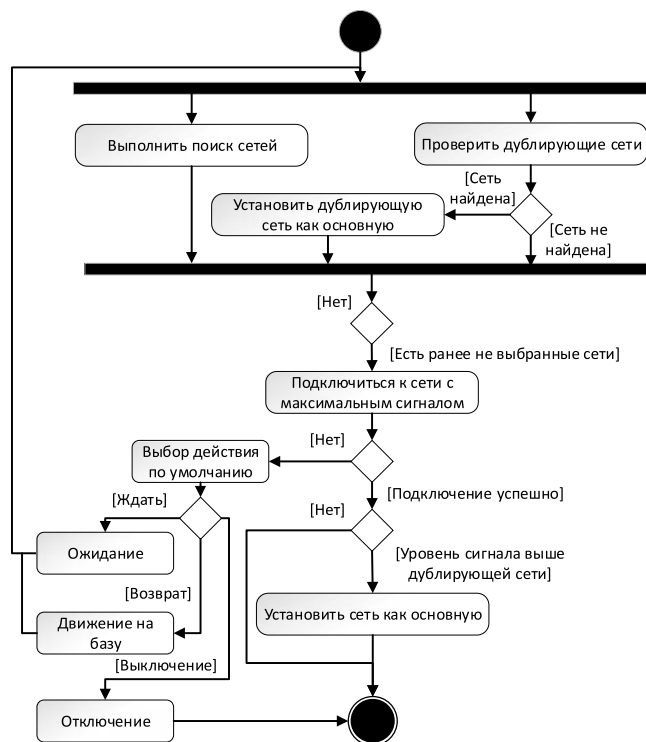


Рис. 1. Диаграмма деятельности для восстановления связи на физическом уровне

Fig. 1. Activity diagram for restoring connectivity at the physical level

К сетевому, транспортному и сеансовому уровням относятся решения, основанные на маршрутизации данных и оверлейных сетях. Такие решения позволяют выполнять самоорганизацию сети и обычно основаны на использовании мобильных ad hoc-сетей (mobile ad hoc networks, MANET) и, в частности, беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Network, WMN). Протоколы MANET приспособлены к изменениям топологии [16], и по этой причине их целесообразно рассматривать в КФС.

Маршрутизация в MANET бывает проактивной, когда узлы периодически распространяют свои таблицы маршрутизации по сети, и реактивной, когда маршрут находится по запросу с помощью специальных multicast-пакетов. Недостаток первого способа — необходимость поддержки большого объема данных и медленная реакция на изменения. Второй способ характеризуется задержками при поиске пути и опасностью переполнения сети служебными пакетами. Гибридным вариантом, позволяющим снизить влияние этих недостатков, является протокол ZRP [17], использующий проактивный подход при передаче данных внутри зоны и реактивный — между зонами. Так обеспечивается кластеризация сети и снижается объем передаваемых данных. Для работы подобных протоколов граф сети должен быть связным. В случае разрыва необходимо изменить топологию сети. Это можно сделать с помощью перемещения узлов КФС или перераспределения их ролей, что выходит за рамки протокола маршрутизации и может сказаться на качестве выполнения прикладных задач. Тем не менее, известен ряд таких решений [18, 19].

С учетом требований гибкости, масштабируемости, децентрализованности, устойчивости к отказам на прикладном уровне следует в первую очередь рассматривать фреймворки работы с большими объемами данных. Такое программное обеспечение (ПО) должно иметь инструменты, которые обеспечат быструю передачу, надежное хранение, репликацию и обмен данными. Большинство таких решений базируются на открытых фреймворках и технологиях вроде Hadoop, Spark и концепции MapReduce. Их преимущество заключается в возможности распределенного выполнения операций обработки и свертки большого объема данных, а при отказе узла его работа автоматически передается другому узлу при условии доступности входных данных. При этом в системе есть еди-

ничные точки отказа — узел имен, а высокие задержки распределенных вычислений, приемлемые в пакетном режиме обработки, не позволяют использовать классический MapReduce в режиме реального времени. Для решения этой проблемы были созданы другие Big Data фреймворки, в частности, Apache Spark, также входящий в экосистему Hadoop.

Рассмотрим поведение системы в случае отказа узла данных. Узел имен периодически получает контрольный сигнал (heartbeat) и отчет о блоках (block report) от каждого узла данных. Если узел имен не получает контрольных сигналов дольше определенного порогового значения от определенного узла данных, то он считается "мертвым" или неисправным. В этом случае система запускает процесс репликации блоков, которые были расположены на неисправном узле согласно его последнему отчету, на новый узел. Данные для репликации переда-

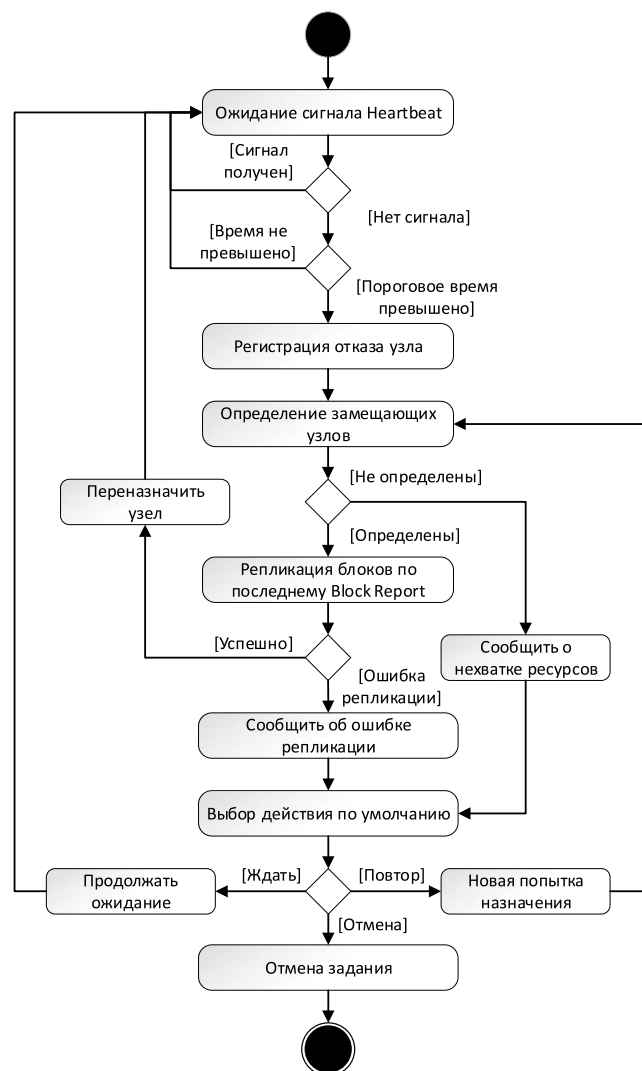


Рис. 2. Диаграмма деятельности для случая отказа узла данных
Fig. 2. Activity diagram for the case of a data node failure

ются напрямую от одного узла данных к другому, минуя узел имен. Диаграмма деятельности для этой ситуации представлена на рис. 2.

Формализация состава, свойств и поведения КФС позволяет выполнить синтез структурно-параметрической модели автономной мобильной КФС для функционирования на открытых территориях в условиях динамического окружения. В качестве входных данных модель получает конечное множество гетерогенных робототехнических средств (РС), их типов и параметров. На выходе требуется получить набор недостающих компонентов КФС для коррекции состава системы в целях ее устойчивого функционирования.

Структурно-параметрическая модель автономной мобильной КФС

В общем случае автономная мобильная КФС *CPS* может быть представлена как конечный набор гетерогенных РС:

$$CPS = \{RS_i | i = \overline{1, N}\},$$

где RS_i — некоторое РС, а N — общее число РС.

В основе структуры такой КФС лежит конечное число V типов РС, и каждое РС RS_i входит в состав одного из наборов гомогенных РС $RSet_v$ ($RS_i \in RSet_v$). Соответственно, КФС может также быть определена следующим образом:

$$CPS = \{RSet_v | RSet_v = \{RS_{vi} | i = \overline{1, I_v}\}, v = \overline{1, V}\},$$

где I_v — общее число задействованных в формировании КФС РС данного типа.

Каждое РС RS_{vi} некоторого типа v , в свою очередь, может быть представлено следующим кортежем параметров:

$$RS_{vi} = \langle Ph_{vi}, Sens_{vi}, Act_{vi} \rangle,$$

где Ph_{vi} — набор физических компонентов (аппаратное обеспечение); $Sens_{vi}$ — набор датчиков, а Act_{vi} — набор исполнительных механизмов. Датчики и исполнительные механизмы являются входными и выходными преобразователями соответственно [20]. Датчики собирают информацию о состоянии среды, а исполнительные механизмы изменяют его.

При разработке автономной мобильной КФС особого внимания требует вопрос обеспечения

ее отказоустойчивости к деструктивным воздействиям среды. Для этого каждое РС оснащается дублирующими компонентами, и для каждого РС характерно наличие идентичных компонентов в наборах Ph_{vi} , $Sens_{vi}$ и Act_{vi} . При этом набор дублирующих компонентов $D(RS_{vi})$ и коэффициенты репликации $R(D(RS_{vi}))$ по умолчанию идентичны для каждого типа РС v :

$$D(RS_{va}) = D(RS_{vb}) = \{DPh_v, DSens_v, DAct_v\}, a \neq b; \\ R(D(RS_{va})) = R(D(RS_{vb})), a \neq b,$$

где DPh_v , $DSens_v$ и $DAct_v$ — наборы дублируемых физических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов соответственно.

В соответствии с принятой концепцией дублирующие компоненты деактивированы, пока не будут задействованы в связи с выходом из строя активных компонентов. Таким образом, каждое РС RS_{vi} , входящее в состав КФС, связано с наборами дублируемых компонентов DPh_{vi} , $DSens_{vi}$, $DAct_{vi}$ и, соответственно, могут быть определены следующие отображения:

$$fPh : RS_{vi} \rightarrow DPh_{vi}, fSens : RS_{vi} \rightarrow DSens_{vi}, \\ fAct : RS_{vi} \rightarrow DAct_{vi}.$$

Принимая во внимание эти выражения, автономная мобильная КФС *CPS* в терминах компонентов может быть определена следующим образом:

$$CPS = \langle Ph, Sens, Act, DPh, DSens, DAct, Lg, Hum \rangle,$$

где Ph — набор активных физических компонентов; $Sens$ — набор активных датчиков; Act — набор активных исполнительных механизмов; DPh — набор резервных физических компонентов; $DSens$ — набор резервных датчиков; $DAct$ — набор резервных исполнительных механизмов; Lg — набор логических компонентов; Hum — набор лиц, вовлеченных в процессы функционирования КФС. Набор Ph — это набор всех активных физических компонентов, размещенных на РС и используемых в процессе функционирования *CPS*:

$$Ph = \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i Ph_{vi} \setminus DPh_{vi} | i = \overline{1, I_v} \right\} | v = \overline{1, V} \right\}.$$

Наборы $Sens$, Act и наборы резервных физических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов определяются схожим образом.

Логические компоненты Lg включают в себя все уровни ПО, а также информацию на уровне данных, информации и знаний [21]. Протекающие в этих компонентах процессы являются преимущественно информационными.

Взаимодействие людей с КФС характеризуется определенной вариативностью. Так, человек может быть как пользователем системы Hum_U , так элементом Hum_{Env} внешней по отношению к КФС среды:

$$Hum = \{Hum_U, Hum_{Env}\}.$$

Определим набор функциональных компонентов КФС F как набор совокупностей логических и физических компонентов системы, которые при взаимодействии формируют базовые единицы функциональности:

$$F = \{\langle Ph_i, Lg_i \rangle | Ph_i \subseteq Ph, Lg_i \subseteq Lg, i = \overline{1, M}\}.$$

По определению каждый компонент F_q обладает аппаратными и вычислительными мощностями, ПО, способен к взаимодействию с другими компонентами, самодиагностике и информированию связанных компонентов об ошибках. Он также связан с определенным набором датчиков и исполнительных механизмов. Такие наборы в совокупности образуют набор преобразователей функциональных компонентов Tr :

$$Tr = \{\langle Sens_j, Act_j \rangle | Sens_j \subseteq Sens, Act_j \subseteq Act, j = \overline{1, L}\},$$

что позволяет функциональным компонентам осуществлять различного рода преобразования на физическом и логическом уровнях в контексте взаимодействия с внешней средой и пользователями КФС, включая как обмен и преобразование энергии (механической, электрической и т. д.) на физическом уровне, так и обмен, преобразование и синтез информации на логическом уровне. Таким образом, для любой КФС может быть определено отображение f :

$$f: F \rightarrow Tr,$$

а автономная мобильная КФС, соответственно, может быть охарактеризована набором упорядоченных пар вида:

$$CPS = \{\langle F_k, Tr_k \rangle | F_k \in F, Tr_k \in Tr, k = \overline{1, K}\}.$$

Следует отметить, что элементы любого преобразователя могут быть интероперабельны, как следствие, наборы элементарных компонентов КФС, входящие в состав некоторого преобразователя, могут входить в состав неограниченного числа иных преобразователей.

Согласованное взаимодействие наборов функциональных компонентов КФС и ассоциированных с ними преобразователей позволяет обеспечить предоставление сервисов КФС S_{CPS} потребителям $Cons$, в качестве которых могут выступать как иные функциональные компоненты, так и люди:

$$Cons = F \cup Hum.$$

Стоит также отметить, что наборы потребителей в общем случае могут отличаться для каждого отдельно взятого сервиса КФС:

$$Cons_S = \{Cons_i | Cons_i \subseteq Cons, i = \overline{1, n}\}.$$

Наличие однозначной ассоциативной связи между наборами потребителей и сервисами КФС позволяет нам ввести следующее отображение g :

$$g: S_{CPS} \rightarrow \{Cons_S | S = \overline{1, ser}\},$$

где ser — общее число сервисов, предоставляемых КФС. Поскольку сервисы реализуются посредством согласованного взаимодействия различных функциональных компонентов, то может быть определено отображение h :

$$h: F \rightarrow S_{CPS}.$$

Таким образом, композиция отображений $h \circ g$ позволяет установить соответствие между потребителями сервисов и функциональными компонентами, необходимыми для реализации соответствующих сервисов.

В то же время каждый преобразователь транзитивно ассоциирован с некоторым сервисом CPS и является одним из средств его предоставления. Учитывая интероперабельность преобразователей, для каждого сервиса S_{CPS} можно определить конечный набор преобразователей, реализующих предоставление данного сервиса для группы потребителей $Cons_S$:

$$e: S_{CPS} \rightarrow \{\{Tr_i | Tr_i \subseteq Tr, i = \overline{1, n}\}_S | S = \overline{1, ser}\}.$$

Рассмотрим далее обобщенную динамическую модель функционирования автономной мобильной КФС. Введем, согласно работе [22], обобщенный вектор состояния КФС и вектор выходных характеристик КФС:

$$x(t) = \|x_F^T, x_{Tr}^T\|^T, y(t) = \|y_F^T, y_{Tr}^T\|^T.$$

Допустим, некоторое изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$ приводит к изменению n различных физических параметров P_i и регистрируется датчиками, в совокупности формирующими набор $Sens_i$:

$$P_{ik} = \{p_{ik} \in P_i | \xi_{ph}(t) \rightarrow P_i, k = \overline{1, n}\};$$

$$Sens_{ij} = \{sens_{ij} \in Sens_i | P_i \rightarrow Sens_i, j = \overline{1, m}\}.$$

Поскольку каждый датчик $sens_{ij}$ из набора датчиков $Sens_i$ может входить в одно или несколько подмножеств вида $Sens_i$, таких что $Sens_i \subseteq Tr_i$, $i = \overline{1, L}$, то регистрация изменений датчиком $sens_{ij}$ приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$, с чьими преобразователями $Tr_{ij} \subseteq Tr$ ассоциирован данный датчик. Учитывая, что с каждым из преобразователей Tr_i , $i = \overline{1, L}$, ассоциирован целый набор датчиков $Sens_i$, то обновленное состояние $x_F(t_1)$ каждого из функциональных компонентов множества F определяется на основе лишь тех изменений физических параметров среды P_{ik} , которые были зарегистрированы датчиками, принадлежащими $Sens_{ii}$. При этом в $Sens_{ii}$ входят только те датчики, которые зарегистрировали изменение внешней среды ($Sens_{ii} \subseteq Sens_i$) и принадлежат набору, входящему в состав соответствующего преобразователя Tr_i ($Sens_{ii} \subseteq Sens_i$):

$$Sens_{ii} = Sens_i \cap Sens_i.$$

Ответ системы на изменения информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ во многом аналогичен ответу на изменения в физической среде. Допустим, изменение $\xi_{Lg}(t)$ приводит к изменению p логических параметров L_i :

$$L_{ij} = \{l_{ij} \in L_i | \xi_{Lg}(t) \rightarrow L_i, j = \overline{1, p}\}$$

и регистрируется логическими компонентами КФС $Lg_i \subseteq Lg$. Поскольку каждый Lg_{ij} из Lg_i может входить в одно или несколько подмножеств вида Lg_i , таких что $Lg_i \subseteq F_i$, $i = \overline{1, M}$, со-

ответственно регистрация изменений компонентом Lg_{ij} приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$, с которыми ассоциирован данный компонент. Учитывая, что с каждым из функциональных компонентов F_i ассоциирован целый набор логических компонентов Lg_i , то обновленное состояние $x_F(t_1)$ каждого из функциональных компонентов множества F определяется исключительно на основе изменений логических параметров L_{ii} , зарегистрированных компонентами, принадлежащими набору Lg_{ii} , в который входят только те логические компоненты, которые зарегистрировали изменение логических параметров ($Lg_{ii} \subseteq Lg_i$) и принадлежат набору логических компонентов, входящему в состав соответствующего функционального компонента F_i ($Lg_{ii} \subseteq Lg_i$): $Lg_{ii} = Lg_i \cap Lg_i$.

Отметим, что в обоих случаях изменение состояния i -го функционального компонента F_i приводит к опосредованному изменению состояний физических и логических компонентов системы, принадлежащих наборам Ph_i и Lg_i соответственно. Кроме того, переход i -го функционального компонента из состояния $x(t_0)$ в состояние $x(t_1)$ может индуцировать изменение выходных характеристик системы $y(t)$, в частности, посредством активации исполнительных механизмов из набора $Act_i \subseteq Tr_i$. Таким образом, датчики реагируют на изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$, вследствие чего формируется новое состояние $x(t_1)$, аналогично система реагирует на изменение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$. Исполнительные механизмы выполняют обратную функцию, преобразуя управляющие сигналы системы в ее новое представление $y(t)$ и воздействуя на физическую среду.

В контексте автономных мобильных КФС важно отметить, что изменение в физической среде не только может быть зарегистрировано набором датчиков вида $Sens_i$, но и может проявить себя как отказ некоторого набора физических компонентов Ph_{if} набора датчиков $Sens_{if}$ и набора исполнительных механизмов Act_{if} вследствие неблагоприятного воздействия внешней среды. Отказ каждого физического компонента Ph_{ifk} (Ph_{ifk} , $k = \overline{1, K}$) из набора Ph_{if} провоцирует отказ ряда функциональных компонентов, в состав которых входят компоненты Ph_{ifk} . Соответственно принадлежность некоторого функционального компонента F_{ifm} к набору отказавших компонентов F_{if} можно определить следующим образом:

$F_{tfm} \in F_{tf}$, если

$$\exists Ph_{tfk} : Ph_{tfk} \subseteq F_{tfm}, Ph_{tfk} \in Ph_{tf}.$$

Набор сервисов КФС S_{tf} отказ которых будет вызван выходом из строя набора F_{tf} может быть определен как $S_{tf} = h(F_{tf})$. Восстановление его работы требует восстановления набора функциональных компонентов F_{tf} . Обладая информацией о наборах вышедших из строя физических компонентов КФС Ph_{tf} и резервных физических компонентов DPh , можно определить набор доступных физических компонентов NPh для формирования функциональных компонентов F_{tmm} , тождественных по сути функциональным компонентам F_{tfm} :

$$NPh = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DPh \setminus Ph_{tf};$$

$$F_{tm} = \{ \langle Ph_i, Lg_i \rangle | Ph_i \subseteq NPh, Lg_i \subseteq Lg, i = \overline{1, M_{tf}} \}.$$

Изменение физической структуры КФС выражается следующим образом:

$$Ph = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tmm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup Ph \setminus Ph_{tf};$$

$$DPh = \left(DPh \cup \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \setminus Ph_{tf} \right) \setminus \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tmm}, i = \overline{1, I_m} \right).$$

Последствия отказа наборов $Sens_{tf}$ и Act_{tf} во многом аналогичны последствиям отказа набора физических компонентов системы. Отказ каждого датчика или исполнительного механизма приводит к нарушению работы ряда преобразователей, в состав которых входят эти датчики и/или исполнительные механизмы. Соответственно, принадлежность некоторого преобразователя Tr_{tfm} к набору отказавших преобразователей Tr_{tf} можно определить следующим образом:

$Tr_{tfm} \in Tr_{tf}$, если

$$\exists Sens_{tfk} : Sens_{tfk} \subseteq Tr_{tfm}, Sens_{tfk} \in Sens_{tf} \vee$$

$$\exists Act_{tfk} : Act_{tfk} \subseteq Tr_{tfm}, Act_{tfk} \in Act_{tf}.$$

Набор сервисов КФС S_{tf} нарушение предоставления которых будет вызвано выходом из строя набора Tr_{tf} может быть определен как $S_{tf} = e(Tr_{tf})$. Возобновление его предоставле-

ния требует восстановления набора преобразователей Tr_{tf} . Обладая информацией о наборах вышедших из строя датчиков $Sens_{tf}$, исполнительных механизмов Act_{tf} и соответствующих резервных наборах $DSens$ и $DAct$, можно определить наборы $NSens$, $NAct$ для формирования преобразователей Tr_{tmm} , тождественных преобразователям Tr_{tfm} :

$$NSens = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DSens \setminus Sens_{tf};$$

$$NAct = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Act_i | Act_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DAct \setminus Act_{tf};$$

$$Tr_{tm} = \{ \langle Sens_j, Act_j \rangle | Sens_j \subseteq NSens, Act_j \subseteq NAct, j = \overline{1, M_{tf}} \}.$$

Соответствующее изменение структуры автономной мобильной КФС CPS для сенсоров может быть отражено следующим образом:

$$Sens = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tmm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup Sens \setminus Sens_{tf};$$

$$DSens = \left(DSens \cup \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \setminus Sens_{tf} \right) \setminus \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tmm}, i = \overline{1, I_m} \right).$$

Изменение наборов исполнительных механизмов Act и $DAct$ выполняется аналогично. Циклическая реализация описанных процессов изменения структуры КФС, состояния ее компонентов и внешней среды отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах. Она учитывает устойчивость системы к деструктивным воздействиям со стороны внешней среды и описывает реакцию системы на такие воздействия.

Заключение

В статье выполнен анализ современного состояния исследований поведения КФС при

временной потере связности системы и отказе ее узлов. Выявлены ограничения известных методов, показано, что нет исчерпывающего подхода к построению устойчивых КФС, функционирующих на открытых территориях в динамической среде. Сформулированы требования для таких КФС, предложены модели поведения, обеспечивающие перераспределение ролей в КФС при выходе узлов из строя, что позволяет повысить автономность и надежность КФС. Формализация поведения КФС позволила выполнить синтез структурно-параметрической модели КФС, ориентированной на функционирование на открытых территориях в динамическом окружении и решение прикладных задач посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов. Модель отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах.

К преимуществам предложенных моделей относятся децентрализация задач, отсутствие критических узлов и узких мест, выход из строя которых приведет к отказам в системе, отсутствие требований прямой видимости или малого расстояния между устройствами, стационарности устройств, возможность работы в динамическом и неизвестном окружении.

Решения ориентированы на применение, прежде всего, в бизнесе и пригодны для использования, к примеру, на предприятиях, оснащенных мобильными РС с камерами: при обработке сельскохозяйственных угодий, доставке грузов, обслуживании инфраструктуры. Это особенно актуально в задачах управления производством в приближающуюся эпоху Industry 5.0, где характерно использование принципов самоорганизации и эволюции при взаимодействии систем искусственного интеллекта и людей [23, 24]. Другие сферы применения результатов — территориальные исследования, спасательные операции, в которых применение предложенных решений позволит более точно выполнять изучение местности, в том числе неисследованных территорий с ограниченной доступностью для человека [25].

В дальнейшем предполагается исследовать вопросы проектирования гетерогенных КФС [26] и разработать модель РС, позволяющую выполнять автоматизированную замену модулей РС другими роботизированными агентами. Предполагается разработать подход к адаптивному управлению инфраструктурой КФС для функционирования в изменяющейся среде.

Список литературы

1. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges // *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Vol. 3, N. 5. P. 637–646.
2. ISO/IEC 7498-1:1994 Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model. 1994. 68 p.
3. Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study // *International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. 2017. P. 417–420.
4. Cagatan G. K. B., Magsumbol J. A. V., Baldovino R., Sybingco E., Dadios E. P. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator // *9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. 2017. P. 1–8.
5. Barriquello C. H., Bernardon D. P., Canha L. N., de Silva F. E. S., Porto D. S., da Silveira Ramos M. J. Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids // *52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2017. P. 1–4.
6. Rabie T., Suleiman S. A novel wireless mesh network for indoor robotic navigation // *5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*. 2016. P. 1–4.
7. Jiménez A. C., García-Díaz V., Bolaños S. A decentralized framework for multi-agent robotic systems // *Sensors*. 2018. Vol. 18, N. 2. P. 417.
8. Kakamoukas G. A., Sarigiannidis P. G., Economides A. A. FANETs in Agriculture-A routing protocol survey // *Internet of Things*. 2020. P. 100183.
9. Khan A., Aftab F., Zhang Z. Self-organization based clustering scheme for FANETs using Glowworm Swarm Optimization // *Physical Communication*. 2019. Vol. 36. P. 100769.
10. Srinivasan S. Design and use of managed overlay networks: thesis. Georgia Institute of Technology, 2007.
11. Majcherczyk N., Jayabalan A., Beltrame G., Pincirolì C. Decentralized connectivity-preserving deployment of large-scale robot swarms // *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018. P. 4295–4302.
12. Guo Y., Hu X., Hu B., Cheng J., Zhou M., Kwok R. Y. Mobile cyber physical systems: Current challenges and future networking applications // *IEEE Access*. 2017. Vol. 6. P. 12360–12368.
13. Foehr M., Vollmar J., Calà A., Leitão P., Karnouskos S., Colombo A. W. Engineering of next generation cyber-physical automation system architectures // *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems*. Springer, Cham, 2017. P. 185–206.
14. Schneider G. F., Wicaksono H., Ovtcharova J. Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic // *Advanced Engineering Informatics*. 2019. Vol. 39. P. 127–143.
15. Okpoti E. S., Jeong I. J. A reactive decentralized coordination algorithm for event-driven production planning and control: A cyber-physical production system prototype case study // *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 58. Part A. P. 143–158.
16. Lambrou T. P., Panayiotou C. G. A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks // *Proceedings of the 5th international conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN'09)*. 2009. P. 78–85.
17. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-04> (дата обращения: 18.09.2021).
18. Ratasich D., Höftberger O., Isakovic H., Shafique M., Grosu R. A self-healing framework for building resilient cyber-physical systems // *2017 IEEE 20th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. 2017. P. 133–140.
19. Höftberger O., Obermaisser R. Ontology-based runtime reconfiguration of distributed embedded real-time systems // *16th*

IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time distributed Computing (ISORC 2013). 2013. P. 1–9.

20. Pallás-Areny R., Webster J. Sensors and Signal Conditioning. New York, John Wiley & Sons, 2001.

21. U. S. Access Board Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U. S. Access Board, Washington, DC). 2010. URL: <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf> (дата обращения: 18.09.2021).

22. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

23. Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О. Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современным предприятием.

Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 323–332.

24. Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О. Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современным предприятием. Часть 2. Цифровые сервисы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 7. С. 387–397.

25. Кычкин А. В., Николаев А. В. Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы интернета вещей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 3. С. 115–123.

26. Ковалев С. П. Проектирование гетерогенных киберфизических систем с применением теории категорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 2. С. 59–67.

A Model of a Decentralized Cyber-Physical System Resiliently Functioning in a Changing Environment

D. K. Levonevskiy, levonevskij.d@iias.spb.su, R. N. Iakovlev, iakovlev.r@mail.ru,

A. I. Saveliev, saveliev@iias.spb.su,

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Levonevskiy Dmitry K., PhD, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: levonevskij.d@iias.spb.su

Accepted on December 03, 2021

Abstract

The article discusses the issues of decentralization and dynamic redistribution of roles in cyber-physical systems (CPS) designed for working in changing environments and especially open spaces, where there are increased risks of module failures and communication loss. In particular, decentralized methods for controlling the CPS behavior and ensuring the redundancy of their components and connections are investigated. A number of requirements for such systems are identified and it is noted what limitations in existing approaches impede the implementation of systems that satisfy these requirements at the physical, network and application layers. For different layers, behavior models are proposed, which provide autonomous role distribution between components. This made it possible to synthesize a structural-parametric model of an autonomous mobile CPS, focused on functioning in open areas and solving applied problems performed through the coordinated interaction of groups of mobile agents. The model takes into account aspects of system stability and its response to destructive influences. The advantages of the proposed models include task decentralization, absence of central, critical nodes and bottlenecks, no line of sight requirements or small distance between devices, ability to work in unexplored environments. The solutions can be applied primarily in the field of business and are suitable for use in industrial plants equipped with mobile robotic devices with cameras, for example, for agricultural tasks, or territorial exploration. The proposed approach makes possible to study the terrain more accurately, including unexplored areas with limited accessibility to humans. Also, the results obtained can be applied during rescue operations.

Keywords: cyber-physical systems, robots, cyber-physical systems architecture, distributed systems, decentralized systems, resilience, reliability

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 20-79-10325.

For citation:

Levonevskiy D. K., Iakovlev R. N., Saveliev A. I. A Model of a Decentralized Cyber-Physical System Resiliently Functioning in a Changing Environment. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 177–187.

DOI: 10.17587/mau.23.177-187

References

1. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges, *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, vol. 3, no. 5, pp. 637–646.

2. ISO/IEC 7498-1:1994 Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model, 1994, 68 p.

3. Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study, *International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 2017, pp. 417–420.

4. Cagatan G. K. B., Magsumbol J. A. V., Baldovino R., Sybingco, E., Dadios E. P. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator, *9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Infor-*

mation Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 2017, pp. 1–8.

5. Barriquello C. H., Bernardon D. P., Canha L. N., de Silva F. E. S., Porto D. S., da Silveira Ramos M. J. Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids, *52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2017, pp. 1–4.

6. Rabie T., Suleiman S. A novel wireless mesh network for indoor robotic navigation, *5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*, 2016, pp. 1–4.

7. Jiménez A. C., García-Díaz V., Bolaños S. A decentralized framework for multi-agent robotic systems, *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 417.

8. Kakamoukas G. A., Sarigiannidis P. G., Economides A. A. FANETs in Agriculture-A routing protocol survey, *Internet of Things*, 2020, p. 100183.

9. Khan A., Aftab F., Zhang Z. Self-organization based clustering scheme for FANETs using Glowworm Swarm Optimization, *Physical Communication*, 2019, vol. 36, p. 100769.

10. Srinivasan S. Design and use of managed overlay networks: thesis, Georgia Institute of Technology, 2007.

11. Majcherczyk N., Jayabalan A., Beltrame G., Pinciroli C. Decentralized connectivity-preserving deployment of large-scale robot swarms, *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 4295–4302.

12. Guo Y., Hu X., Hu B., Cheng J., Zhou M., Kwok R. Y. Mobile cyber physical systems: Current challenges and future networking applications, *IEEE Access*, 2017, vol. 6, pp. 12360–12368.

13. Foehr M., Vollmar J., Calà A., Leitão P., Karnouskos S., Colombo A. W. Engineering of next generation cyber-physical automation system architectures, *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems*. Springer, Cham, 2017. pp. 185–206.

14. Schneider G. F., Wicaksono H., Ovtcharova J. Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic, *Advanced Engineering Informatics*, 2019, vol. 39, pp. 127–143.

15. Okpoti E. S., Jeong I. J. A reactive decentralized coordination algorithm for event-driven production planning and control: A cyber-physical production system prototype case study, *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, Part A, pp. 143–158.

16. Lambrou T. P., Panayiotou C. G. A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks, *Proceedings*

of the 5th international conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN'09), 2009, pp. 78–85.

17. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks, available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-04> (accessed: 18.09.2021).

18. Ratasich D., Höftberger O., Isakovic H., Shafique M., Grosu R. A self-healing framework for building resilient cyber-physical systems, *2017 IEEE 20th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2017, pp. 133–140.

19. Höftberger O., Obermaisser R. Ontology-based runtime reconfiguration of distributed embedded real-time systems, *16th IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time distributed Computing (ISORC 2013)*, 2013, pp. 1–9.

20. Pallás-Areny R., Webster J. Sensors and Signal Conditioning, New York, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 2001.

21. U. S. Access Board Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U. S. Access Board, Washington, DC), 2010, available at: <https://www.access-board.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf> (accessed: 18.09.2021)

22. Ohtilev M. Ju., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects. Moscow, Nauka, 2006, 410 p. (in Russian)

23. Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O. Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises Part 1. Digital Platform and Digital Ecosystem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 323–332 (in Russian).

24. Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O. Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises. Part 2. Digital Services, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleni*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 387–397 (in Russian).

25. Kychkin A. V., Nikolaev A. V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 115–123 (in Russian).

26. Kovalyov S. P. Designing Heterogeneous Cyber-Physical Systems Using Category Theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 59–67 (in Russian).



31 мая – 21 июня 2022 г. в Санкт-Петербурге
на базе ОАО "Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»
состоится

XXVIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru



И. Ю. Пчелинцева, аспирант, irina_yu_10@mail.ru,
Ю. В. Литовка, д-р техн. наук, проф., polychem@list.ru,
Тамбовский государственный технический университет

Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токонепроводящим экраном

Обсуждается разработанная авторами автоматизированная система управления процессом нанесения гальванических покрытий, имеющая двухуровневую архитектуру. На нижнем уровне осуществляется управление технологическими параметрами каждой ванны: стабилизация температуры и уровня электролита в ванне; стабилизация или программное управление электрическим током. На верхнем уровне решается задача расчета оптимальной конфигурации токонепроводящего перфорированного экрана (определяются число и ширина отверстий), обеспечивающей минимальное значение неравномерности нанесения цинкового покрытия. Для этого разработана нелинейная математическая модель гальванического процесса в ванне с перфорированным экраном, отличающаяся от известных добавлением краевых условий на токонепроводящем экране. Отмечено, что нелинейности содержат уравнения модели, описывающие граничные условия вблизи анода и катода гальванической ванны. Поэтому разработан численный метод решения уравнений модели, отличающийся реализацией метода Ньютона в математическом пакете Mathcad через перенаправление ввода/вывода. В работе описан алгоритм работы с математическим пакетом, особенностью которого является подготовка команд пакета в текстовом формате и парсинг полученных результатов вычислений также из текстового файла. Применяемый численный метод для решения системы уравнений модели имеет квадратичную скорость сходимости, что указывает на его эффективность на большой сетке, например, из 900 узлов. Многочисленные вычислительные эксперименты показали десятикратный выигрыш во времени по сравнению с традиционным итерационным методом, описанным в известных статьях.

Впервые поставлена и решена задача дискретной оптимизации для разработанной автоматизированной системы управления процессом нанесения гальванического покрытия. Особенностью постановки данной задачи являются ограничения, допускающие только полный перебор возможных значений варьируемых параметров, объем которого не велик. Поэтому использовался последовательный алгоритм решения задачи оптимизации. Приведены комбинации возможных значений варьируемых параметров и значения критерия, а также проанализировано время решения задачи оптимизации.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, процесс нанесения гальванического покрытия, критерий неравномерности, математическая модель, метод Ньютона, оптимизация, метод полного перебора

Введение

Электролитические процессы нанесения гальванических покрытий имеют широкое промышленное применение: защита изделий от коррозии, повышение износостойкости, сообщение отражательной способности и т. д. Для нанесения металлопокрытия изделие сначала подвергают механической обработке, затем осуществляется химическое травление с последующей промывкой. Только после этого на обработанную деталь (катод) в специально приготовленном электролите под постоянным током наносят слой металла определенной толщины. Качество получаемого покрытия на катоде определяется распределением металла по поверхности детали. Поэтому важной задачей здесь является нанесение более равномерного покрытия.

Как известно [1, 2], если нанести покрытие на плоскую деталь в гальванической ванне, мы получим профиль покрытия, напоминающий по форме так называемое "корыто", т. е. на краях детали толщина гальванического покрытия может намного превышать толщину в центре катода. Этот эффект объясняется неравномерностью электрического поля вблизи поверхности катода. Еще более сложная картина распределения гальванического покрытия по поверхности катода наблюдается при не плоской его форме.

Для снижения неравномерности гальванического покрытия в промышленности применяют различные методы, одним из которых является использование тонких токонепроводящих экранов с отверстиями. Экраны устанавливают в поперечном сечении ванны. При этом на распределение покрытия влияет

положение экрана относительно катода; число, расположение и ширина отверстий. Поиск указанных параметров, при которых получается наиболее равномерное покрытие, в результате проведения физических экспериментов показывает [3, 4], что данный процесс связан с очень большими затратами времени, материальных и финансовых ресурсов. Выход из данной негативной ситуации возможен путем использования математических методов моделирования, системного анализа и оптимизации.

Цель работы — создание автоматизированной системы управления процессом нанесения гальванопокрытий, обеспечивающей минимальное значение неравномерности покрытия путем использования перфорированных токонепроводящих экранов с оптимальными параметрами.

Для достижения цели необходимо разработать архитектуру системы управления; поставить и решить задачу оптимизации; построить математическую модель гальванического процесса в ванне с токонепроводящим перфорированным экраном и разработать численный метод решения ее уравнений.

Математическая постановка задачи

Исходные данные для постановки задачи оптимизации следующие.

Рассмотрим гальваническую ванну, имеющую форму параллелепипеда, с размерами дна l_1, l_2 по координатам x, y , соответственно; с высотой слоя электролита l_3 (координата z) и с плоским бесконечно тонким анодом, который имеет прямоугольную форму. Положим, что анод располагается по центру вдоль стенки ванны, параллельно ей. Зададим x_{al}, x_{ar} — координаты расположения краев анода. Деталь-катод может иметь любую форму; для построения математической модели и решения задачи оптимизации упростим ситуацию, задав форму катода в виде пластины, которая, как и анод, располагается по центру вдоль противоположной аноду стенки ванны, параллельно ей. Зададим x_{cl}, x_{cr} — координаты расположения краев катода; L — ширина катода. Пусть внутри ванны параллельно аноду располагается поперечный бесконечно тонкий плоский токонепроводящий экран, который имеет отверстия прямоугольной формы. Высота экрана и таких отверстий совпадает с высотой слоя электролита l_3 , ширина экрана равна l_1 . Примем, что все

отверстия имеют прямоугольную форму одинаковой ширины PL . Число отверстий N_{pl} . Пример расположения в гальванической ванне анода, катода и токонепроводящего экрана с двумя отверстиями ($N_{pl} = 2$) представлен на рис. 1.

Вид токонепроводящего экрана, соответствующего рис. 1, представлен на рис. 2.

Для упрощения задачи примем допущение, что в любом горизонтальном сечении ванны конфигурация электрического поля не будет изменяться. Тогда все расчеты для любого горизонтального сечения (для любого $0 \leq z \leq l_3$) будут эквивалентны. Соответственно, распределение толщины δ гальванического покрытия в таком сечении будет зависеть только от координаты x : $\delta(x)$.

Математическая постановка задачи оптимизации примет вид: найти ширину PL и число



Рис. 1. Горизонтальное сечение гальванической ванны с сеткой по координатам x и y

Fig. 1. Horizontal section of a galvanic bath with a grid along x and y coordinates



Рис. 2. Вид токонепроводящего экрана

Fig. 2. View of a non-conductive screen

N_{pl} отверстий прямоугольной формы в токонепроводящем экране, при которых критерий неравномерности R принимает минимальное значение:

$$R = \frac{1}{L} \int_{x_{cl}}^{x_{cr}} \frac{\delta(x) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}} dx \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\delta_{\min} = \min_{x \in [x_{cl}, x_{cr}]} \delta(x)$, $\delta_{\min}$ — минимальное значение толщины покрытия на поверхности катода.

Математическая модель процесса нанесения гальванического покрытия

Для связи критерия R с варьируемыми параметрами PL и N_{pl} построим математическую модель.

Пусть $\phi(x, y)$ — потенциал электрического поля в точке с координатами (x, y) . Уравнение Лапласа, описывающее распределение потенциала в произвольном горизонтальном сечении в электролите гальванической ванны, имеет вид

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Зададим граничные условия, описывающие потенциалы поля на аноде, катоде, стенках ванны и токонепроводящем экране.

Потенциалы поля на аноде $\phi(x, 0)$, $x \in [x_{al}, x_{ar}]$, и катоде $\phi(x, l)$, $x \in [x_{cl}, x_{cr}]$, связаны с так называемыми функциями $F_a(i_a)$ и $F_c(i_c)$ анодной и катодной поляризации [5] следующими соотношениями:

$$\phi(x, 0) + F_a(i_a(x)) = U, \quad \phi(x, l) - F_c(i_c(x)) = 0, \quad (3)$$

где i_a, i_c — анодная и катодная плотности тока; U — анодное напряжение.

Функции поляризации определяются аппроксимацией экспериментальных данных.

Заметим, что ток течет от большего потенциала к меньшему (от анода к катоду — положительное направление тока вдоль оси Oy). Закон Ома в этом случае в дифференциальной форме вблизи анода и катода имеет вид

$$\begin{aligned} i_a(x) &= -\chi \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,0)}, \quad x \in [x_{al}, x_{ar}]; \\ i_c(x) &= -\chi \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)}, \quad x \in [x_{cl}, x_{cr}], \end{aligned} \quad (4)$$

где χ — удельная проводимость электролита.

Далее опишем граничные условия для стенок ванны (отсутствие тока через стенки — условие изоляции):

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{(0,y)} = 0, \quad y \in [0, l]; \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{(l,y)} = 0, \quad y \in [0, l]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,0)} = 0, \quad x \in [0, x_{al}]; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,0)} = 0, \quad x \in (x_{ar}, l]; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)} = 0, \quad x \in [0, x_{cl}]; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)} = 0, \quad x \in (x_{cr}, l]. \quad (7)$$

Для плоской бесконечно тонкой стенки с отверстиями (токонепроводящего экрана) граничные условия запишутся в виде

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,p)} = 0, \quad x \in [x_{pl}^{(m)}, x_{pr}^{(m)}], \quad m = 1, \dots, n, \quad (8)$$

где p — y -координата стенки; $x_{pl}^{(m)}, x_{pr}^{(m)}$ — координаты расположения краев m -й части изоляционного экрана; n — число таких частей. Отметим, что $n = N_{pl} + 1$.

Таким образом, мы получили математическую модель (2)–(8), решением уравнений которой является функция $\phi(x, y)$ потенциала в каждой точке с координатами (x, y) гальванической ванны. Отличие построенной математической модели от известных [2, 8–10] заключается в добавлении граничных условий (8).

Толщина получаемого покрытия на детали вычисляется по закону Фарадея

$$\delta(x) = \frac{k_{Me}}{\rho} i_c(x) \Delta t, \quad (9)$$

где $x \in [x_{cl}, x_{cr}]$; k_{Me} — электрохимический эквивалент металла покрытия; ρ — плотность металла покрытия; Δt — время процесса (нанесения покрытия).

Численный метод решения уравнений модели (2)–(9)

Заметим, что задача (2)–(9) является нелинейной, так как содержит нелинейные краевые условия (3). Найти аналитическое решение данной задачи, как правило, не представляется возможным, поэтому будем решать ее численно. Для этого введем сетку по координатам x и y :

$$\begin{aligned} x_i &= (i-1)h_x, \quad y_j = (j-1)h_y, \\ i &= 1, \dots, N_x, \quad j = 1, \dots, N_y, \end{aligned}$$

где h_x и h_y — шаги сетки (т. е. численного интегрирования) по x и y соответственно, нумерация

узлов сетки идет с единицы; N_x и N_y — максимальные номера узлов по x и y соответственно.

В задаче (2)—(9) заменим производные первого и второго порядков их разностными аналогами:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx \frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{h_x^2};$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \approx \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{h_y^2};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{(0,y)} \approx \frac{\phi_{2,j} - \phi_{1,j}}{h_x};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{(l,y)} \approx \frac{\phi_{N_x,j} - \phi_{N_x-1,j}}{h_x};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{(x,0)} \approx \frac{\phi_{i,2} - \phi_{i,1}}{h_y};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{(x,l)} \approx \frac{\phi_{i,N_y} - \phi_{i,N_y-1}}{h_y};$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{(x,p)} \approx \frac{\phi_{i,N_p} - \phi_{i,N_p-1}}{h_y},$$

где N_p — номер слоя сетки по j , где располагается изоляционный экран.

Получим систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{h_y^2} = 0, \\ i = 2, \dots, N_x - 1 \ \& \ j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p, \\ i = p_r^{(k)}, \dots, p_l^{(k+1)} \ \& \ j = N_p, \quad k = 1, \dots, N_{pl}; \\ \frac{\phi_{2,j} - \phi_{1,j}}{h_x} = 0, \quad j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p; \\ \frac{\phi_{N_x,j} - \phi_{N_x-1,j}}{h_x} = 0, \quad j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p; \\ \frac{\phi_{i,2} - \phi_{i,1}}{h_y} = 0, \quad i = 1, \dots, a_l - 1, a_r + 1, \dots, N_x; \\ \frac{\phi_{i,N_y} - \phi_{i,N_y-1}}{h_y} = 0, \quad i = 1, \dots, c_l - 1, c_r + 1, \dots, N_x; \\ \frac{\phi_{i,N_p} - \phi_{i,N_p-1}}{h_y} = 0, \quad i = p_l^{(m)}, \dots, p_r^{(m)}, \quad m = 1, \dots, N_{pl} + 1; \\ \phi_{i,1} + F_a \left(-\chi \frac{\phi_{i,2} - \phi_{i,1}}{h_y} \right) - U = 0, \quad i = a_l, \dots, a_r; \\ \phi_{i,N_y} - F_c \left(-\chi \frac{\phi_{i,N_y} - \phi_{i,N_y-1}}{h_y} \right) = 0, \quad i = c_l, \dots, c_r, \end{array} \right.$$

где $h_x = h_y$, a_l, a_r, c_l, c_r — номера узлов сетки, где находятся левый и правый края анода и катода соответственно; $p_l^{(m)}, p_r^{(m)}$ — номера узлов сетки, соответствующих краям частей изоляционного экрана, $m = 1, \dots, N_{pl} + 1$.

Отметим, что полученная нелинейная система алгебраических уравнений замкнута, и число неизвестных в ней равно $g = N_x N_y$.

Объединим неизвестные величины

$$\begin{aligned} \phi_{1,1}, \phi_{1,2}, \dots, \phi_{1,N_y}, \phi_{2,1}, \phi_{2,2}, \dots, \phi_{2,N_y}, \dots, \\ \dots, \phi_{N_x,1}, \phi_{N_x,2}, \dots, \phi_{N_x,N_y} \end{aligned} \quad (10)$$

в вектор $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_g]^T$.

Перепишем систему как

$$\Lambda(\Psi) = 0, \quad (11)$$

где $\Lambda(\Psi)$ — векторная функция от Ψ , содержащая g компонент.

Для нахождения приближенного решения Ψ^* системы (11) будем использовать метод Ньютона. Чтобы его применить, нужно правильно выбрать вектор начального приближения $\Psi^{(0)}$. Заметим, что при движении от анода к катоду потенциал убывает. Максимальный потенциал, который может быть на аноде (т. е. при нулевой поляризации), равен U , а на катоде — 0 В. Тогда начальное приближение на первом слое сетки по j возьмем равным $\psi_{(i-1)N_y+1}^{(0)} \equiv \phi_{i,1}^{(0)} = U$, на последнем слое $\psi_{(i-1)N_y+N_y}^{(0)} \equiv \phi_{i,N_y}^{(0)} = 0$ при $i = 1, \dots, N_x$. В промежуточных слоях сетки по j сделаем линейную интерполяцию:

$$\psi_{(i-1)N_y+j}^{(0)} \equiv \phi_{i,j}^{(0)} = U \frac{N_y - j}{N_y - 1}. \quad (12)$$

Классическая численная схема метода Ньютона имеет вид [6]

$$\Psi^{(r)} = \Psi^{(r-1)} - [\nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})]^{-1} \Lambda(\Psi^{(r-1)}), \quad (13)$$

где $r = 1, 2, 3, \dots$ — номер итерации; $\nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})$ — якобиан функции Λ в точке $\Psi^{(r-1)}$.

Чтобы получить из формулы (13) текущее приближение к решению системы (11), якобиан в формуле (13) при вычислениях не обращают, так как операция обращения матрицы требует большого объема вычислений даже самым быстрым методом; например, при $N_x = N_y = 30$ получается нелинейная система из 900 уравнений. Вместо этого формулу (13) можно

привести к системе линейных уравнений относительно $\Psi^{(r)}$ вида

$$\nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})\Psi^{(r)} = \nabla \Lambda(\Psi^{(r-1)})\Psi^{(r-1)} - \Lambda(\Psi^{(r-1)}). \quad (14)$$

Для решения системы (14) наиболее эффективным методом на сегодняшний день является модификация метода Гаусса: LU-разложение, имплементированное во многих математических пакетах и библиотеках. Мы будем использовать свободный пакет символьных вычислений Maxima [7], где уже реализовано LU-разложение в методе Ньютона.

Приближенное решение системы (11) будем искать с точностью ε . В пакете Maxima точность вычислений контролируется проверкой значения модуля разности векторов $\Psi^{(r)}$ и $\Psi^{(r-1)}$ на соседних итерациях:

когда выполнено условие

$$|\Psi^{(r)} - \Psi^{(r-1)}| < \varepsilon,$$

приближенное решение найдено, т. е.

$$\Psi^* \approx \Psi^{(r)}.$$

Распределение толщины получаемого покрытия на детали вычисляется по формуле (9). Чтобы рассчитать ее в мкм, используем следующее соотношение с учетом одной из формул (4) для плотности катодного тока:

$$\begin{aligned} \delta(x) &= 100 \frac{k_{Me}}{\rho} i_c(x) \Delta t = -100 \frac{k_{Me}\chi}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{(x,l)} \Delta t \approx \\ &\approx 100 \frac{k_{Me}\chi}{\rho} \frac{\phi_{i,N_y-1} - \phi_{i,N_y}}{h_y} \Delta t, \end{aligned} \quad (15)$$

где $x \in [x_{cl}, x_{cr}]$; $i = c_l, \dots, c_r$.

Для расчета значения критерия неравномерности заменим определенный интеграл, входящий в формулу (1), дискретным аналогом по формуле трапеций:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{L} \left(\frac{\delta(x_{c_l}) + \delta(x_{c_r})}{2\delta_{\min}} - 1 + \sum_{i=c_l+1}^{c_r-1} \left(\frac{\delta(x_i)}{\delta_{\min}} - 1 \right) \right) h_x = \\ &= \frac{1}{c_r - c_l} \left(\frac{\delta(x_{c_l}) + \delta(x_{c_r})}{2\delta_{\min}} + \frac{\sum_{i=c_l+1}^{c_r-1} \delta(x_i)}{\delta_{\min}} + c_l - c_r \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Работа с математическим пакетом Maxima

Перед вызовом пакета Maxima в операционной системе Linux нужно подготовить для него текстовый файл с командами. Во избежание наложения файлов имя этого файла должно содержать идентификаторы значений варьируемых параметров критерия R . Эти параметры будут описаны в следующем пункте данной статьи.

Рассмотрим алгоритм построения командного файла пакета:

1. Определить функции $F_a(i_a)$ и $F_c(i_c)$, указывая в конце знак \$, так как результат не нужно выводить в консоль.

2. Выключить многострочное рисование выражений через **display2d:false\$**, т. е. оставить только текстовый вывод в строку.

3. Загрузить библиотеку с реализацией метода Ньютона **load(mnewton);**.

4. Установить точность вычислений **newtonepsilon:10^-2\$**.

5. Вызвать функцию метода Ньютона командой **mnewton();**, для которой в символьном виде построить следующие аргументы: список выражений, стоящих в левой части каждого из уравнений системы (11), список неизвестных потенциалов (10) и список начальных приближений для них, заранее вычисленных по формуле (12).

Вызов пакета из расчетной программы, написанной на языке C++, осуществляется с помощью стандартной функции **system()** языка C с перенаправлением ввода на сформированный командный файл и вывода в результирующий текстовый файл.

После работы пакета необходимо осуществить несложный парсинг полученного файла в целях получения двумерного массива потенциалов $\phi_{i,j}$ в гальванической ванне. Только после этого можно вычислить распределение толщины получаемого покрытия и значение критерия R .

Решение задачи оптимизации

Многочисленные вычислительные эксперименты с дискретной моделью (11), (15), (16) показали, что на значение критерия R слабо влияет положение отверстий в экране (изменение на 1...2 %), но сильно влияет число N_{pl} и ширина PL отверстий, когда экран достаточно близок к катоду.

Также, начиная с некоторого значения N_{pl} , на значение R оказывает влияние и положение экрана, но в данной работе мы его считаем константой. В оптимизационной задаче в качестве варьируемых параметров используются величины N_{pl} и PL в предположении, что все отверстия имеют одинаковую ширину и расположены симметрично относительно середины экрана. Так как алгоритм использует сетку, логично выбирать значение PL , равное числу шагов сетки, охватывающих каждое из отверстий. Следовательно, ширина каждого отверстия будет рассчитываться как $PL \cdot h_x$.

Определим границы изменения варьируемых параметров. Целую величину N_{pl} будем изменять от 1 до заданного максимального числа $N_{\max}$ отверстий. Левая граница для целого значения PL равна двум (чтобы поле проходило через отверстия), а правую границу $PL_{\max}(N_{pl})$ определим по значению N_{pl} :

$$PL_{\max}(N_{pl}) = \left\lceil \frac{N_x - 1 - L_{pr_{\min}}(N_{pl} + 1)}{N_{pl}} \right\rceil,$$

где $[a]$ — целая часть числа a ; $L_{pr_{\min}}$ — минимальная ширина изоляционных частей экрана, взятая в шагах сетки. Мы предполагаем, что $L_{pr_{\min}} = 2$.

Однако не все комбинации значений N_{pl} и PL будут допустимы. Как было указано выше, отверстия на сетке должны располагаться симметрично относительно середины экрана. Тогда нужно при выборе пары N_{pl} и PL вычислить ширину $L_{pr}(N_{pl}, PL)$ изоляционных частей экрана в шагах сетки по формуле

$$L_{pr}(N_{pl}, PL) = \frac{N_x - 1 - N_{pl} \cdot PL}{N_{pl} + 1}.$$

Если получим целое значение L_{pr} (т. е. изоляционные части можно уложить на сетке), то пара N_{pl} и PL является допустимой.

Таким образом, мы получаем следующую задачу целочисленной оптимизации:

$$\begin{cases} R(N_{pl}, PL) \rightarrow \min, \\ N_{pl} \in [1, N_{\max}], \\ PL \in [2, PL_{\max}(N_{pl})], \\ L_{pr}(N_{pl}, PL) - \text{целое}, \\ N_{pl}, PL - \text{целые}. \end{cases} \quad (17)$$

Поскольку правая граница для варьируемого параметра PL зависит от выбора значе-

ния параметра N_{pl} , то для решения задачи (17) будем использовать метод полного перебора. Данный метод имеет два преимущества: простота и гарантированное нахождение оптимального решения.

Пример решения задачи оптимизации

Расчеты проведем для реальной гальванической ванны цинкования, на которой проводились эксперименты для проверки адекватности разработанной математической модели.

Будем рассматривать процесс цинкования в щелочном электролите, имеющем следующий состав: ZnO — 10 г/л, NaOH — 150 г/л, блескообразующая добавка "Экомет С 1Б" — 3 г/л.

Функции поляризации описанного щелочного электролита, полученные аппроксимацией экспериментальных данных методом наименьших квадратов, имеют вид [5]

$$F_a(i_a) \equiv 1, 2;$$

$$F_c(i_c) = 0,0016i_c^2 + 0,055i_c + 1,347,$$

где значения F_a и $F_c(i_c)$ измеряются в вольтах, i_c — в А/дм².

Размеры ванны, анода, катода и токонепроводящего экрана следующие: $l_1 = l_2 = 0,986$ дм (далее все размеры приближены к величинам, кратным шагу численного интегрирования уравнений математической модели); $l_3 = 0,14$ дм; $x_{al} = 0,272$ дм; $x_{ar} = 0,714$ дм; $x_{cl} = 0,34$ дм; $x_{cr} = 0,646$ дм; $n = 3$; $p = 0,884$ дм; $x_{pl}^{(1)} = 0$ дм; $x_{pr}^{(1)} = 0,238$ дм; $x_{pl}^{(2)} = 0,374$ дм; $x_{pr}^{(2)} = 0,612$ дм; $x_{pl}^{(3)} = 0,748$ дм; $x_{pr}^{(3)} = 0,986$ дм.

Удельная проводимость электролита цинкования $\chi = 0,35$ (Ом·дм)⁻¹.

Электрохимический эквивалент цинка $k_{Me} = 1,22$ г/(А·ч), плотность цинка $\rho = 7,133$ г/см³, время нанесения покрытия $\Delta t = 0,67$ ч. Как показали многочисленные натурные эксперименты с цинкованием плоских деталей, за это время формируется покрытие средней толщиной 23 мкм, что является наиболее распространенным значением в машиностроительной промышленности.

Положим, что к электродам гальванической ванны подведено постоянное напряжение $U = 3,67$ В.

Значения номеров описанных выше узлов сетки: $N_x = N_y = 30$; $N_p = 27$; $a_l = 9$; $a_r = 22$; $c_l = 11$; $c_r = 20$; $p_l^{(1)} = 1$; $p_r^{(1)} = 8$; $p_l^{(2)} = 12$; $p_r^{(2)} = 19$; $p_l^{(3)} = 23$; $p_r^{(3)} = 30$.

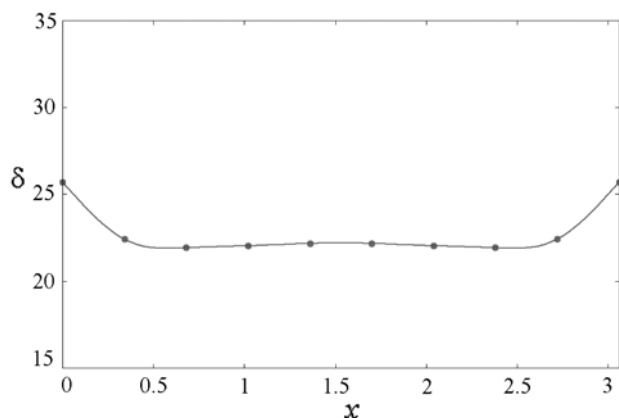


Рис. 3. Распределение покрытия по поверхности детали (размерность по оси x — см, по оси δ — мкм), отсчет по оси x идет от края катода

Fig. 3. Distribution of the coating over the surface of the detail (a dimension along x axis is cm, a dimension along δ axis is μm), the x -axis reads from the edge of the cathode

В результате решения задачи оптимизации разработанной программой все возможные комбинации пар N_{pl} и PL и критерия R в процентах при этих значениях сведены в таблицу. Как видно из нее, решением задачи оптимизации являются значения $N_{pl} = 2$ (т. е. два отверстия в токонепроводящем экране) и $PL = 7$ (т. е. 7 шагов по сетке как ширина каждого отверстия). Значения критерия R при этом равно 2 %, что является минимальным среди всех вариантов. Время, затраченное на полный перебор, на компьютере с процессором Intel Core i5-9400 с тактовой частотой 2,9 ГГц составило 306 мин или 5 ч 6 мин.

Решение задачи (17) методом полного перебора

Номер комбинации	N_{pl}	PL	R , %
1	1	3	13
2	1	5	20
3	1	7	23
4	1	9	24
5	1	11	22
6	1	13	21
7	1	15	20
8	1	17	19
9	1	19	18
10	1	21	18
11	1	23	18
12	1	25	17
13	2	4	4
14	2	7	2
15	2	10	4
16	3	3	12
17	3	7	22

Примечание: серым цветом отмечен минимум критерия R .

На рис. 3 представлено распределение толщины получаемого покрытия на детали при оптимальном значении варьируемых параметров. Для наглядности точки соединены кубическим сплайном.

Таким образом, решена задача поиска оптимальных значений варьируемых переменных — ширины PL и числа N_{pl} отверстий прямоугольной формы в токонепроводящем экране, при которых критерий неравномерности R принимает минимальное значение. Применяемый численный метод для решения системы (11) — дискретного аналога уравнений модели (2)—(9) — имеет квадратичную скорость сходимости, что указывает на его эффективность на сетке из 900 узлов. Многочисленные вычислительные эксперименты показали [2] десятикратный выигрыш во времени по сравнению с итерационным методом, описанным в статьях [8—10]. Авторы использовали реализацию метода Ньютона в математическом пакете Matha через перенаправление ввода/вывода.

Стоит отметить, что добавление еще одной варьируемой переменной — положения экрана относительно катода, а также расчеты для катода произвольной формы потребуют разработки оптимизационного метода, более эффективного, чем полный перебор, например, распараллеливание применяемого алгоритма.

Архитектура автоматизированной системы управления

Наиболее распространенным оборудованием для нанесения электрохимических покрытий в промышленности являются гальванические линии. Как известно, гальваническая линия состоит из набора ванн, в которых проводятся операции подготовки деталей (обезжиривание, травление и т. д.); нанесения покрытия (таких ванн может быть несколько); заключительных операций (промыть, сушка) [11—20]. Для автоматизированного управления технологическими процессами гальванической линии предлагается двухуровневая архитектура системы управления (рис. 4).

В зависимости от процессов, протекающих в ванне, могут измеряться следующие технологические параметры: температура, уровень, ток, напряжение. На нижнем уровне осуществляется управление технологическими параметрами каждой ванны: стабилизация температуры и уровня



Рис. 4. Двухуровневая архитектура системы управления гальванической линией

Fig. 4. Two-level architecture of the electroplating line control system

электролита; стабилизация или программное управление электрическим током. В качестве вычислительного устройства нижнего уровня используются микропроцессорные контроллеры.

Заключение

В данной статье рассмотрена разработанная авторами автоматизированная система управления процессом нанесения гальванопокровов, имеющая двухуровневую архитектуру. Вычислительное устройство верхнего уровня решает задачу расчета оптимальной конфигурации токопроводящего перфорированного экрана. Исходными данными для расчета являются форма и размеры детали, поступившей на обработку. Двухуровневая система по сравнению с одноуровневой отличается большей надежностью, гибкостью; позволяет осуществлять поочередное внедрение подсистем управления, а распределение функций между вычислительными устройствами нижнего и верхнего уровня позволяет использовать более простую и, следовательно, более дешевую вычислительную технику.

Разработанная автоматизированная система управления гальваническими процессами принята к использованию на гальваническом участке ООО "Завод Тамбовполимермаш".

Список литературы

1. Каданер Л. И. Равномерность гальванических покрытий. Харьков: Изд-во Харьк. ГУ, 1960. 414 с.

2. Pchelintseva I. Yu., Pchelintsev A. N., Litovka Yu. V. Modeling of metal distribution when coating flat metal plates in electroplating baths // International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2021. Vol. 34, Iss. 2. e2830. 10 p.

3. Шульгин В. Г. Распределение тока и повышение равномерности осаждения металлов в гальванотехнике и гальванопластике. Л.: ЛДНТП, 1983. 31 с.

4. Пчелинцева И. Ю. О проверке адекватности модели электрического поля в гальванической ванне с плоским токопроводящим экраном // Тезисы докладов XXX Международной научно-технической конференции "Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации". 2021. С. 75–76.

5. Кудрявцев Н. Т. Электролитические покрытия металлами. М.: Химия, 1979. 352 с.

6. Demidovich B. P., Maron I. A. Computational mathematics. M.: Mir Publishers, 1981. 688 p.

7. Система компьютерной алгебры Maxima. URL: <http://maxima.sourceforge.net/ru/> (дата обращения: 09.11.2021).

8. Dutov A. V., Sypalo K. I., Solovjev D. S., Litovka Y. V., Solovjeva I. A., Nesterov V. A. Search for the optimal control over current regimes in electroplating processes with multi anodes at a diversified assortment of treated articles // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. Vol. 58, N. 1. P. 75–85.

9. Litovka Yu. V., Mikhnev V. V. Numerical calculation of the electric field in an electroplating bath with bipolar electrodes // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2006. Vol. 40, N. 3. P. 305–310.

10. Litovka Yu. V., Elizarov A. M. A method for calculating the thickness of a coating on a complex-shaped electrode // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2003. Vol. 37. P. 88–91.

11. Оборудование цехов электрохимических покрытий. Справочник / Под ред. П. М. Вячеславова. Л.: Машиностроение, 1987. 310 с.

12. Marenkova E. A., Shamshurin A. I., Kuznetsov S. A. Electrodeposition of tantalum coatings for corrosion protection of nitinol articles // Applied Electrochemistry and Corrosion Protection of Metals. 2015. Vol. 88. P. 398–406.

13. Vinokurov E. G., Meshalkin V. P., Vasilenko E. A., Nemyatullina Kh. A., Burukhina T. F., Bondar V. V. System analysis of the efficiency and competitiveness of chroming technologies // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2016. Vol. 50. P. 730–738.

14. Frenzel I., Holdik H., Barmashenko V., Stamatialis D. F., Wessling M. Electrochemical reduction of dilute chromate solutions on carbon felt electrodes // Journal of Applied Electrochemistry. 2006. Vol. 36. P. 323–332.

15. Виноградов О. С., Виноградова Н. А., Завалин В. В., Ульянов А. А. Способы повышения техноферной безопасности электрохимических производств // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10, № 3 (55). С. 154–158.

16. Дасоян М. А., Пальмская И. Я. Оборудование цехов электрохимических покрытий. Л.: Машиностроение, 1979. 287 с.

17. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии. Справочное издание / Под ред. Б. В. Строкана, А. М. Сухотина. Л.: Химия, 1987. 280 с.

18. Виноградов С. С. Организация гальванического производства. Оборудование, расчет производства, нормирование. М.: Глобус, 2005. 240 с.

19. Грилихес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.

20. Румянцев Е. М., Давыдов А. Д. Технология электрохимической обработки металлов. М.: Высшая школа, 1984. 159 с.

Automated Control System for the Process of Electroplating in a Bath with a Non-Conductive of Electric Current Screen

I. Yu. Pchelintseva, irina_yu_10@mail.ru, Yu. V. Litovka, Professor, polychem@list.ru, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation

Corresponding author: Litovka Yury V., Dr. Sci., Professor, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation, e-mail: polychem@list.ru

Accepted on 03 December, 2021

Abstract

The article has developed an automated control system for the electroplating process, which has a two-level architecture. At the lower level, the technological parameters of each bath are controlled: temperature stabilization and electrolyte level in the bath; stabilization or software control of electric current. At the upper level, the problem of calculating the optimal configuration of a non-conductive of electric current perforated screen is solved, providing a minimum value of the unevenness of the coating. For this, a nonlinear mathematical model of the galvanic process in a bath with a perforated screen is developed which differs from the known ones by adding boundary conditions on a non-conductive screen. It is noted that the nonlinearities contain the equations of the model describing the boundary conditions near the anode and cathode of the galvanic bath. Therefore, a numerical method for solving the model equations is developed, which is distinguished by the implementation of Newton's method in Maxima (the mathematical package) through input/output redirection. The article describes an algorithm for working with a mathematical package, a feature of which is the preparation of package commands in a text format and parsing the results of calculations also from a text file. The applied numerical method for solving the system of model equations has a quadratic convergence rate which indicates its effectiveness on a large grid, for example, of 900 nodes. Numerous computational experiments is shown a tenfold gain in time compared to the traditional iterative method described in well-known articles.

For the first time, the problem of discrete optimization was posed and solved for the developed automated control system for the electroplating process. A feature of the formulation of this problem are restrictions that allow only a complete enumeration of possible values of the varied parameters, the volume of which is not large. Therefore, a sequential algorithm for solving the optimization problem is used. The combinations of possible values of the varied parameters and criterion values are given, and the time for solving the optimization problem is analyzed.

Keywords: automated control system, electroplating process, criterion of uneven, mathematical model, Newton's method, optimization, exhaustive search method

For citation:

Pchelintseva I. Yu., Litovka Yu. V. Automated Control System for the Process of Electroplating in a Bath with a Non-Conductive of Electric Current Screen, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 188–196.

DOI: 10.17587/mau.23.188-196

References

1. Kadaner L. I. The uniformity of electroplated coatings, Kharkov, Kharkov State University Publishing House, 1960, 414 p. (in Russian).
2. Pchelintseva I. Yu., Pchelintsev A. N., Litovka Yu. V. Modeling of Metal Distribution when Coating Flat Metal Plates in Electroplating Baths, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2021, vol. 34, no. 2, e2830, 10 p.
3. Shulgin V. G. Current distribution and increased uniformity of metal deposition in electroplating and electroplating, Leningrad, LHSTP, 1983. 31 p. (in Russian).
4. Pchelintseva I. Yu. On checking the adequacy of the electric field model in an electroplating bath with a flat non-conductive screen, *XXX International Scientific and Technical Conference "Modern Technologies in Problems of Control, Automation and Information Processing"*. Alushta, 2021, pp. 75–76 (in Russian).
5. Kudryavtsev N. T. Electrolytic coatings with metals, Moscow, Khimiya Publ., 1979, 352 p. (in Russian).
6. Demidovich B. P., Maron I. A. Computational mathematics, Moscow, Mir Publishers, 1981, 688 p.
7. Maxima computer algebra system, available at: <http://maxima.sourceforge.net/> (date of access: November 9, 2021).
8. Dutov A. V., Sypalo K. I., Solovjev D. S., Litovka Y. V., Solovjeva I. A., Nesterov V. A. Search for the Optimal Control over Current Regimes in Electroplating Processes with Multi Anodes at a Diversified Assortment of Treated Articles, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, no. 1, pp. 75–85.
9. Litovka Yu. V., Mikheev V. V. Numerical Calculation of the Electric Field in an Electroplating Bath with Bipolar Electrodes, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2006, vol. 40, no. 3, pp. 305–310.
10. Litovka Yu. V., Elizarov A. M. A Method for Calculating the Thickness of a Coating on a Complex-Shaped Electrode, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2003, vol. 37, pp. 88–91.
11. Vyacheslavov P. M. ed. An equipment for workshops of electrochemical coatings. Handbook, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1987, 310 p. (in Russian).
12. Marenkova E. A., Shamshurin A. I., Kuznetsov S. A. Electrodeposition of Tantalum Coatings for Corrosion Protection of Nitinol Articles, *Applied Electrochemistry and Corrosion Protection of Metals*, 2015, vol. 88, pp. 398–406.
13. Vinokurov E. G., Meshalkin V. P., Vasilenko E. A., Nevmyatullina Kh. A., Burukhina T. F., Bondar V. V. System Analysis of the Efficiency and Competitiveness of Chroming Technologies, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, pp. 730–738.
14. Frenzel I., Holdik H., Barmashenko V., Stamatialis D. F., Wessling M. Electrochemical Reduction of Dilute Chromate Solutions on Carbon Felt Electrodes, *Journal of Applied Electrochemistry*, 2006, vol. 36, pp. 323–332.
15. Vinogradov O. S., Vinogradova N. A., Zavalin V. V., Ulyanov A. A. The Methods of Increasing the Technosphere Safety of Electrochemical Production, *XXI century: results of the past and problems of the present plus*, 2021, vol. 10, no 3 (55), pp. 154–158 (in Russian).
16. Dasoyan M. A., Palmskaya I. Ya. Equipment for shops of electrochemical coatings, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1979, 287 p. (in Russian).
17. Strokan B. V., Sukhotin A. M. ed. A corrosion resistance of chemical production equipment: Methods for protecting equipment from corrosion. Reference edition, Leningrad, Khimiya Publ., 1987 p. (in Russian).
18. Vinogradov S. S. Organization of galvanic production. Equipment, production calculation, rationing, Moscow, Globus Publ., 2005, 240 pp. (in Russian).
19. Grilikhes S. Ya. Degreasing, etching and polishing of metals, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1983, 101 pp. (in Russian).
20. Rummyantsev E. M., Davydov A. D. Technology of electrochemical treatment of metals, Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1984, 159 pp. (in Russian).

С. Н. Васильев, акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, vassilyev_sn@mail.ru,
А. А. Галеев, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, galaev@ipu.ru,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
В. В. Залетин, канд. техн. наук, vzaletin@mail.ru, **К. С. Кулаков**, канд. техн. наук, kulakov@npo-sm.ru,
М. В. Сильников, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, director@npo-sm.ru,
Е. И. Якушенко, акад. РАН, д-р техн. наук, yakushenko@npo-sm.ru,
НПО "Специальных материалов", г. Санкт-Петербург

Совместное использование мехатронных систем для организации эффективного противодействия скоординированному действию торпед противника

Рассмотрена задача группового применения множественных источников широкополосных шумов высокой интенсивности, действующих в различных точках пространства в течение заданного времени и создающих возможность защищаемому объекту совершить маневр уклонения. Рассмотрены способы образования помех на основе электро-взрыва. Предложено в качестве подобных источников использовать мехатронные устройства гидроакустического противодействия, способные двигаться в водной среде и создавать широкополосную помеху заданной интенсивности. Совместное применение мехатронных устройств для защиты морского подвижного объекта (цели) определяет суть задачи управления. Рассмотрен модельный пример применения мехатронных устройств в заданном сценарии.

Ключевые слова: электровзрыв, мехатронные устройства гидроакустического противодействия, групповое управление, система самонаведения

Введение

Ядерное оружие, как это определено в обновленной Военной доктрине Российской Федерации, утвержденной Президентом России В. В. Путиным 25 декабря 2014 г., "будет оставаться важным фактором предотвращения ядерных военных конфликтов и военных конфликтов с применением обычных средств поражения (крупномасштабной войны, региональной войны)" [1, ст. 16]. Исходя из этого посыла можно отметить, что одной из основных задач Российской Федерации по сдерживанию и предотвращению военных конфликтов является "поддержание потенциала ядерного сдерживания на достаточном уровне" [1, ст. 21].

Морские силы ядерного сдерживания формируют большую часть потенциала глубокого ответного удара сил ядерного сдерживания (СЯС) России, поскольку им априори присуща повышенная живучесть благодаря высокой скрытности действий при нахождении в море [2].

Анализ зарубежных программ создания новейших систем вооружения, развития совре-

менных концепций применения, направленности боевой подготовки позволяет сделать вывод, что в США и странах западной коалиции проводится активная плановая подготовка Вооруженных сил к ведению войн нового поколения против Российской Федерации.

Боевые действия объединенных Вооруженных сил планируются в единой информационной сети, с широким применением информационных технологий и сетевых методов ведения войны [3]. Основу единой информационной сети составляют быстро разворачиваемые системы освещения воздушной, наземной, надводной и подводной обстановки космического, воздушного и морского базирования, объединенные с системами навигации и связи.

Торпедное оружие (ТО) до настоящего времени остается основным средством как для борьбы с надводными кораблями и подводными лодками, так и средством борьбы самих подводных лодок против надводных кораблей и подводных лодок вероятного противника. Существующие торпеды являются высокоточным, быстродействующим видом оружия, характе-

ризующимся большой дальностью действия, высокой скрытностью применения и значительными информационно-вычислительными возможностями. Так, в состав бортовой аппаратуры торпеды МК-54, состоящей на вооружении США и стран НАТО, входит ЭВМ типа AN/AYK-14 с высокой производительностью (около 1,2 Гфлопс) обработки данных, адаптивными алгоритмами поиска, распознавания целей и наведения торпеды [4]. Торпеда MU-90 Imprast, состоящая на вооружении некоторых стран НАТО, по данным иностранных источников, с высокой эффективностью способна разобраться с ситуацией из 10...12 целей, включая ложные [5], выделить из реальных приоритетную цель и поразить ее с вероятностью не менее 0,9 [6]. При этом классификация цели осуществляется по 12 параметрам [6].

Для наведения торпедного оружия в настоящее время используются активно-пассивные системы самонаведения (ССН) автономных торпед, а также системы наведения по каналу связи с удаленным оператором [7]. В последнем случае наведение торпеды осуществляется по проводам, а в качестве средства целеуказания выступает бортовой гидроакустический комплекс (ГАК) подводной лодки, осуществляющей атаку. Поскольку между атакующей торпедой и средствами освещения обстановки и обработки информации ПЛ имеется непосредственная проводная связь, данный высокоточный комплекс торпедного оружия обеспечивает поражение целей с больших дистанций. При этом, если пассивная ССН торпеды работает в частотном диапазоне от 10 кГц (МК54) [7] до 15 кГц (Black Shark), то активная — в диапазоне 25 кГц (МК54)...30 кГц (Black Shark). В режиме "телеуправления" с использованием ГАК подводной лодки (например, AN/BQQ-X) задействуется рабочий диапазон частот от 200 Гц до 5,5 кГц. В условиях сетцентрических методов ведения войны целеуказания могут поступать и от иных средств подводного наблюдения, таких как радиогидроакустические буи с диапазоном частот от 30 Гц до 5 кГц [8], гидроакустические комплексы надводных кораблей с частотным диапазоном от 3 Гц до 3 кГц [9].

Таким образом, для эффективного противодействия торпедному оружию необходимо создать устройство гидроакустического противодействия (ГПД), способное сформировать широкополосную гидроакустическую помеху в диапазоне частот от 3 Гц до 30 кГц.

Справка: устройства ГПД предназначены для создания гидроакустических помех, ложных гидроакустических целей, искажения спектрально-временных характеристик гидроакустических полей. Одной из наиболее распространенных в мире систем ГПД стала американская AN/SLQ-25 "Никси". Только в ВМС США ею оборудованы более 200 кораблей. Испытания "Никси" завершены в 1970 г., а в 1974 г. она принята на вооружение ВМС США. На подводных лодках получили распространение самоходные постановщики помех — своеобразные торпеды, после запуска имитирующие акустические параметры субмарины. В частности, в СССР в 1974 г. на вооружение был принят самоходный многоцелевой прибор ГПД МГ-74 "Корунд". По своим внешним обводам, основным составным частям, энергосиловой установке, системе управления движением, вспомогательным системам и устройствам, элементам стыковки с торпедным аппаратом прибор аналогичен электрической торпедой. В режиме подавления приборы излучают мощные гидроакустические помехи; в режиме ловушки имитируют ходовые шумы и эхосигналы подлодки, маневрируя по программе, соответствующей поведению субмарины при уклонении от противолодочных сил и от самонаводящихся торпед.

Средства искусственного интеллекта (ИИ), в том числе на основе нейронных сетей [10, 11], используемые в системах интеллектуального управления (СИУ) ТО, обеспечивают высокую вероятность попадания торпеды в цель. Система интеллектуального управления структурно и функционально объединяет в себе ССН и приборный отсек (ПО) торпеды. По оценкам западных источников, вероятность поражения морского подводного объекта (МПО) одной торпедой превышает 95 % [5]. При залповой стрельбе вероятность уничтожения МПО приближается к 100 % и переходит из расчетной категории в практическую.

Несмотря на активные исследования в области создания и применения противоторпедной защиты (ПТЗ), включающей ГПД и антиторпедную защиту (АТ), до настоящего времени в спектре мнений известных зарубежных специалистов нет единого мнения о действительно высокоэффективной системе ПТЗ. Кроме того, постоянное расширение возможностей систем наведения торпед снижает эффективность применения средств ПТЗ, что обуславливает необходимость их совершенствования.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что для защиты МПО от

торпедного оружия целесообразно исключить поступление в СИУ ТО информации о среде функционирования МПО, тем самым блокировав возможности поиска, распознавания и выбора целей с наведением автономного ТО. Для этого предлагается существенно увеличить уровень акустической помехи в диапазоне действия гидроакустической станции (ГАС) обнаружителя (при телеуправлении) и системы автономного самонаведения ТО.

К средствам ГПД, создающим искусственные помехи, относятся устройства, которые организуют заградительную или прицельную помеху с целью затруднить прием СИУ автономного ТО или ГАС обнаружителя первичного или вторичного сигнала от МПО, а также специальные имитаторы, называемые ложными целями, источник шумов которых удаляется в сторону от защищаемого объекта, уводя торпеды в сторону от него.

В данной работе предлагается использовать множественные источники широкополосных шумов высокой интенсивности, действующие в различных точках пространства в течение заданного времени и создающие возможность защищаемому объекту совершить маневр уклонения. Подобные источники являются мехатронными устройствами, способными двигаться в водной среде и создавать широкополосную помеху заданной интенсивности. Совместное применение мехатронных устройств для защиты МПО (цели) определяет суть задачи управления. Эти задачи относятся к задачам планирования автономных групповых миссий управляемых источников помех с оптимизацией траектории уклонения цели.

При решении такой задачи необходимо учитывать, что торпеда может двигаться по двум типам траекторий: догонной и коллизионной. На догонных траекториях вектор скорости, совпадающий с осью торпеды, направлен на цель. Коллизионные траектории имеют постоянный угол упреждения между вектором скорости торпеды и направлением на цель. Он является параметром, который выбирается перед выстрелом на основании данных о цели. Некоторые ССН используют методы пропорционального наведения, в случае когда вектор скорости направлен на точку упреждения, задаваемую решением торпедного треугольника.

Известно, что дальность хода современных торпед достигает 15...20 км. Основную часть дистанции торпеда проходит под действием

системы автономного управления, что заметно снижает вероятность поражения цели. Чтобы избавиться от этих недостатков, были разработаны противолодочные торпеды с системами управления по проводам. В последние годы они получают все большее распространение, поскольку, как считают зарубежные специалисты, они обеспечивают большую вероятность поражения цели по сравнению с другими системами управления торпедами и не подвержены действию помех. Создание таких торпед расценивается на западе как одно из наиболее важных усовершенствований подводного оружия в послевоенный период.

В иностранной печати подчеркивается, что положительное свойство торпед, управляемых по проводам, состоит в том, что при стрельбе такими торпедами нет необходимости иметь точные данные об элементах движения цели и рассчитывать точку залпа. Можно выстрелить торпедой на основе приближенных данных и в дальнейшем корректировать ее движение в район цели. Таким образом, торпеды могут выстреливаться сразу же после обнаружения противника, что резко повышает вероятность попадания в цель, особенно на больших дальностях. Управление торпедой по проводам дало возможность устранить помехи от собственных шумов и увеличить скорость ее движения до 60 уз.

Современные шланговые системы телеуправления имеют высокую надежность и практически не налагают ограничений на маневрирование ПЛ. Кроме того, вследствие связи между торпедой и средствами освещения обстановки и обработки информации ПЛ реализуется высокоточный комплекс ТО, обеспечивающий поражение целей с больших дистанций.

Явление электровзрыва

В современных средствах тактического противодействия для создания акустической помехи применяются пьезоэлектроакустические излучатели, имеющие ограниченные частотный и динамический диапазоны. Вследствие этого данные устройства не могут одновременно воздействовать и на ССН автономного ТО, и на ГАС обнаружителей для подавления теленаведения. Соответственно, вероятность успешного наведения ТО на МПО остается достаточно высокой.

Подводный электровзрыв [12] вследствие электрогидравлического эффекта [13] в макси-

мальной степени удовлетворяет требованиям организации мощной широкополосной помехи. В этом случае давление во фронте ударной волны достигает 10^8 Па, температура — $40\,000\text{ }^\circ\text{C}$, интегральный уровень звукового давления на расстоянии 50 м — 175 дБ, что на 40...70 дБ, в зависимости от частотного диапазона, превышает уровни шумоизлучения морского подводного объекта и отраженного эхо-сигнала. На рис. 1 представлена осциллограмма уровня подводного шума, сформированного электровзрывом мощностью 2 кДж. Ширина спектра подводного электровзрыва составляет от единиц герц до десятков килогерц (рис. 2) и перекрывает частотные диапазоны всех гидроакустических средств наблюдения, вне зависимости от носителя (подводные лодки (ПЛ), надводные корабли (НК), авиация, ТО) (рис. 3).

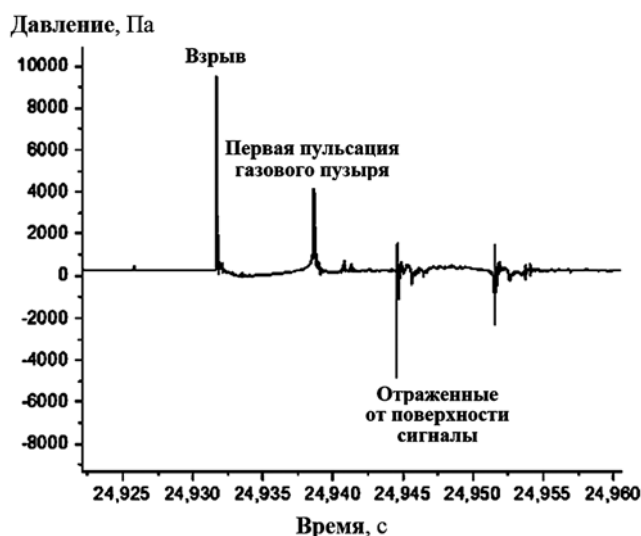


Рис. 1. Осциллограмма уровня давления, формируемого подводным электровзрывом мощностью 2 кДж
Fig. 1. An oscillogram of the pressure level formed by an underwater electric explosion with a power of 2 kJ

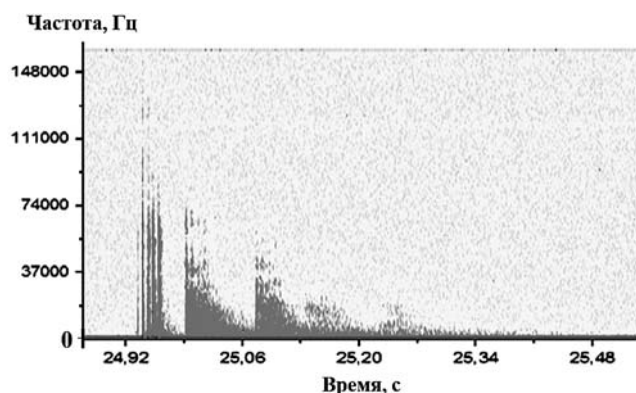


Рис. 2. Спектр подводного электровзрыва мощностью 2 кДж
Fig. 2. The spectrum of an underwater electric explosion with a capacity of 2 kJ

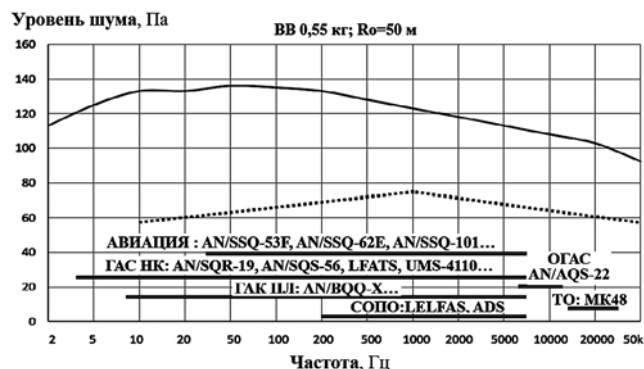


Рис. 3. Спектр электровзрыва и диапазоны рабочих частот обнаружителей
Fig. 3. Electric explosion spectrum and operating frequency ranges of detectors

Таким образом, вследствие высокого уровня акустической помехи на поверхностях антенн бортовых ГАС обнаружителей (ПЛ, НК, опускаемых вертолетных станций, авиационных буюв) существенно снижаются дальности обнаружения МПО, и, соответственно, применение теленавещения ТО становится невозможным. СИУ автономного ТО также теряют функции самонавещения на МПО, что существенно уменьшает вероятность поражения МПО торпедным оружием.

Мехатронное устройство гидроакустического противодействия

Структурная схема предлагаемого устройства ГПД, по сути являющегося мехатронной системой и названного авторами "Петарда", изображена на рис. 4. Внешний вид мехатронного модуля устройства ГПД представлен на рис. 5.

Мехатронная система ГПД представляет собой набор взаимодействующих друг с другом (см. рис. 4) модулей:

- приема гидроакустических сигналов;
- излучения гидроакустических сигналов;
- управления движением;
- формирования гидроакустической помехи, а также узлов: приводов, движителя, рулей управления, разрядной системы и т. д.

В структуре системы информационно-логического взаимодействия устройства ГПД, представленной на рис. 6, определены следующие основные мехатронные модули: входной, анализирующе-командный, управления параметрами движения и управления параметрами высоковольтного разряда.

Входной модуль объединяет гидроакустическую антенну, предварительные и основные усилители, аналого-цифровой преобразователь.



Рис. 4. Структура предлагаемого устройства ГПД

Fig. 4. The structure of the proposed hydroacoustic counteraction device

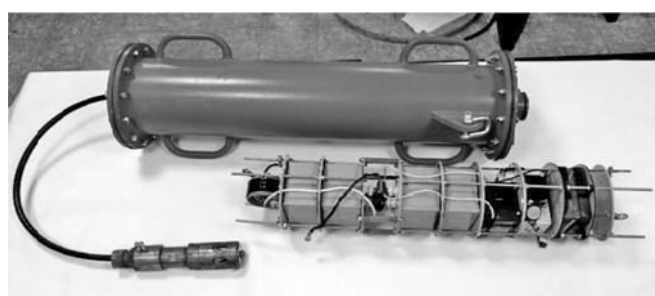


Рис. 5. Внешний вид мехатронного модуля устройства ГПД

Fig. 5. Appearance of the mechatronic module of the hydroacoustic counteraction device

Анализирующе-командный модуль — это прежде всего высокопроизводительный процессор, алгоритмическое и программное обеспечение. При этом высокая производительность,

достигающая 10^{15} флорпс [14], и миниатюризация современных вычислительных устройств позволяют создать аппаратные средства обработки результатов измерений с минимальными габаритными размерами и массой.

Модуль управления параметрами высоковольтного разряда обеспечивает управление параметрами (амплитудой и периодом следования) высоковольтных разрядов в водной среде.

Модуль управления параметрами движения обеспечивает

необходимые режимы движения по курсу, скорости и глубине мехатронной системы ГПД.

Все модули объединены между собой шиной передачи данных.

Информация о параметрах окружающей среды и внешней обстановке поступает от входного модуля на анализирующе-командный модуль, где выполняется оценка тактической ситуации и вырабатываются команды на модуль управления параметрами движения и модуль управления параметрами высоковольтного разряда.

Из рассмотренных модулей мехатронной системы наибольший интерес представляет модуль управления параметрами высоковольтного разряда (ММУ ПВР) (рис. 7).

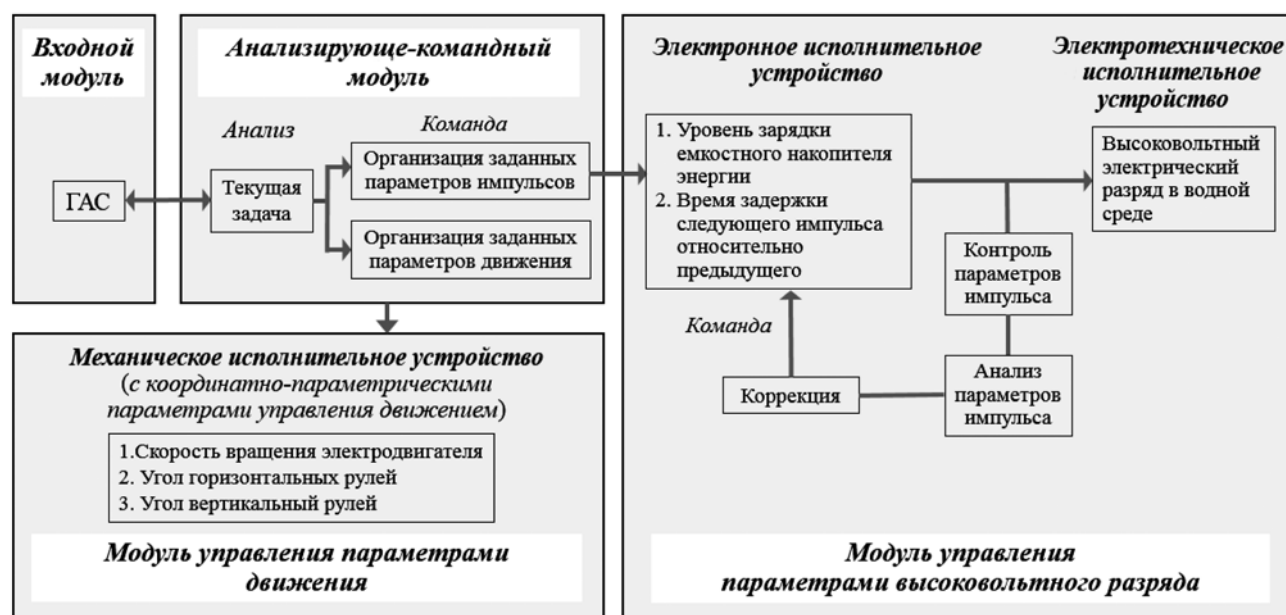


Рис. 6. Информационно-логическое взаимодействие мехатронных модулей системы ГПД

Fig. 6. Information and logical interaction of mechatronic modules

Основными элементами модуля являются:

- емкостной накопитель электроэнергии;
- зарядное устройство;
- источник питания;
- погружная электроразрядная система;
- устройства коммутации (K1 и K2);
- схема измерения в составе датчиков тока и напряжения, а также аналого-цифрового преобразователя;
- исполнительные устройства управления (И1 и И2) коммутаторами.

Зарядное устройство предназначено для зарядки емкостного накопителя энергии до заданного уровня напряжения, причем уровень зарядки определяется временем замкнутого состояния коммутатора K1. Чем больше времени коммутатор K1 находится в замкнутом состоянии, тем больше уровень зарядки емкостного накопителя энергии. При замыкании коммутатора K2 запасенная электроэнергия поступает на погружную электроразрядную систему (ПЭРС), которая обеспечивает формирование высоковольтного электрического разряда через разрядный промежуток и преобразование электрической энергии в гидродинамический импульс.

Контроль параметров электрического импульса через ПЭРС осуществляется с помощью схемы измерения в составе датчиков тока и напряжения, а также аналого-цифрового преобразователя.

Общее управление, порядок излучения гидродинамических импульсов, анализ ресурса и состояния системы, а также качества высоковольтного разряда осуществляется бортовым компьютером.

При управлении параметрами высоковольтного разряда (амплитудой и периодом следования импульсов) возможно имитировать различные "поведенческие" признаки мехатронной системы (рис. 8).

Так, в случае увеличения периода следования импульсов и при одновременном уменьшении амплитуды возможно

имитировать удаление объекта при фактическом движении параллельным курсом с постоянной скоростью (вариант 1), а в случае уменьшения периода следования импульсов и увеличения амплитуды — имитировать приближение объекта (вариант 2).

Стендовые и натурные испытания работоспособности ММУ ПВР, проведенные, соответственно, в марте—июне 2021 г. на материальной базе НПО "Спецматериалов" (г. Санкт-Петербург) и в июне 2021 г. на гидроакустическом полигоне АО морского подводного оружия "Гидроприбор" в бухте Владимирова Ладожского озера, подтвердили возможность управления параметрами импульса. При стендовых испытаниях генерировались серии импульсов с различной амплитудой (рис. 9).

На рис. 10 (см. вторую сторону обложки) представлена раскадровка съемки импульса, генерируемого модулем, камерой высокоскоростной съемки. Здесь с интервалом 4 мс отображе-



Рис. 7. Мехатронный модуль управления параметрами высоковольтного разряда (ММУ ПВР)

Fig. 7. Mechatronic module for controlling high-voltage discharge parameters

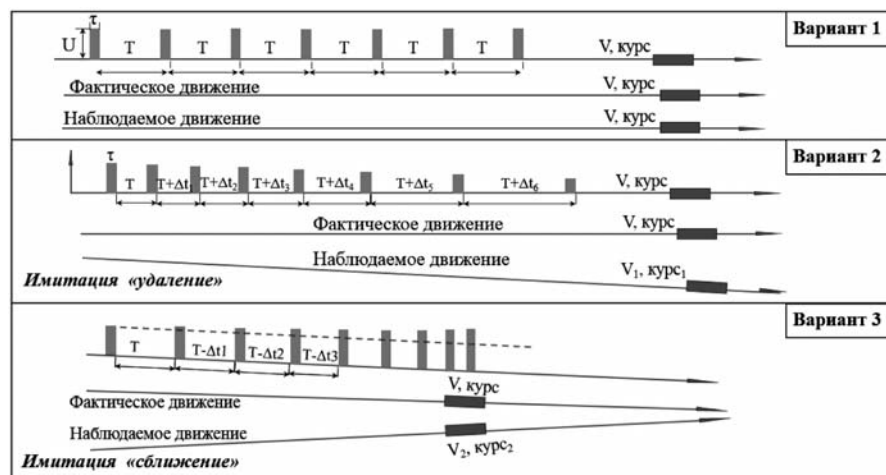


Рис. 8. Имитация "поведенческих" признаков мехатронной системы

Fig. 8. Imitation of "behavioral" signs of a mechatronic system

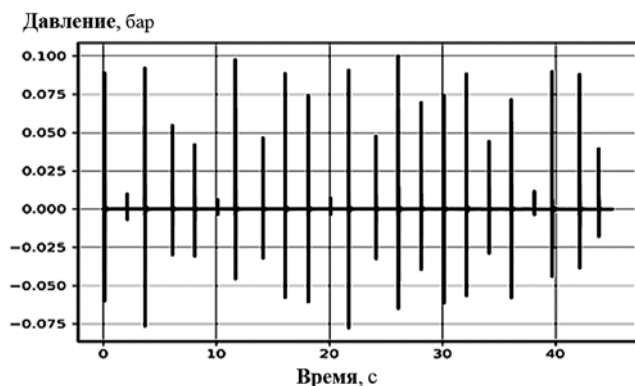


Рис. 9. Серия из 23 импульсов с различной амплитудой, сгенерированных ММУ ПВР

Fig. 9. A series of 23 pulses with different amplitudes

на картина явлений, возникающих в результате срабатывания установки: пробой водной среды и искровой разряд (0 мс), взрывное расширение канала разряда и образование пузыря (4 мс), максимальный объем пузыря (8 мс), его схлопывание (12 мс) и затухающие пульсации (16 мс).

В ходе натурных испытаний ММУ ПВР была верифицирована физико-математическая модель мехатронного устройства на базе электрогидравлического эффекта как источника мощной широкополосной гидроакустической помехи (рис. 11, см. вторую сторону обложки).

По результатам стендовых и натурных испытаний получено подтверждение эффективности работы модуля.

В связи с актуальностью защиты МПО от ТО, для сокращения временного и материального ресурсов на разработку новой мехатронной системы ГПД систем самонаведения ТО и ГАС обнаружителей возможна ее реализация на базе уже разработанной малогабаритной торпеды ММТ [15, 16] со следующими тактико-техническими характеристиками:

Длина, мм	3200
Калибр, мм	324
Масса ВВ, кг	60
Дальность действия ССН, м	2500
Глубина хода, м	до 600
Скорость хода, уз.	до 50 (более 25 м/с).

Использованная в качестве экспериментального носителя ММУ ПВР торпеда состоит из следующих основных элементов: головного отсека (ГО) с ССН; боевого зарядного отделения со взрывчатым веществом и взрывателями (БЗО); приборного отсека (ПО); энергосилового отсека (ЭСО) с двигателем и рулями управления [15] (рис. 12, см. вторую сторону обложки).

Для преобразования торпеды в систему ГПД предлагается заменить БЗО на электроэнергетическую установку с электродными парами, которая имеет те же габаритные и весовые характеристики (рис. 13, см. вторую сторону обложки).

В данной установке необходимо доработать плату управления, расположенную в приборном отсеке, ориентированную на более мощный процессор и программное обеспечение для решения задач ГПД, тем самым создать СИУ ГПД, объединяющую в себе ССН и ПО и отличную от СИУ ТО.

Задача группового управления

Классические законы наведения, наиболее ярким примером которых является пропорциональная навигация (ПН), демонстрировали свою эффективность в алгоритмах наведения на цель вплоть до начала 1970-х гг. Однако к середине 1970-х гг. возможности ПЛ-целей по прогнозированию траекторий атакующего ТО показали, что оружие с наведением по принципу ПН может быть неэффективным против них. К тому времени применение теории оптимального управления к задачам наведения уже было достаточно развито, что позволило предложить новые и потенциально более перспективные проекты законов наведения, используемые в интеллектуальных ССН. Примерно в это время вычислительная мощность, необходимая для реализации таких передовых алгоритмов, была уже вполне достаточной для того, чтобы сделать их применение практичным. Большинство современных законов управления выведены с использованием линейно-квадратичной (LQ) теории оптимального управления для получения аналитических решений с обратной связью. Многие из современных формализаций учитывают маневр цели, что позволяет иметь дело со сценариями, учитывающими высокую маневренность цели (особенно это касается задач терминального наведения). Доступность информации об ускорении цели для закона наведения варьируется в зависимости от возможностей и типа датчика наведения и конкретной формулировки закона наведения. Как правило, в современных формулировках делается явное предположение о динамических характеристиках цели, торпеды и возможностях автопилота. Оказывается, что ПН является оптимальным законом наведения в отсутствие временной задержки в автопилоте

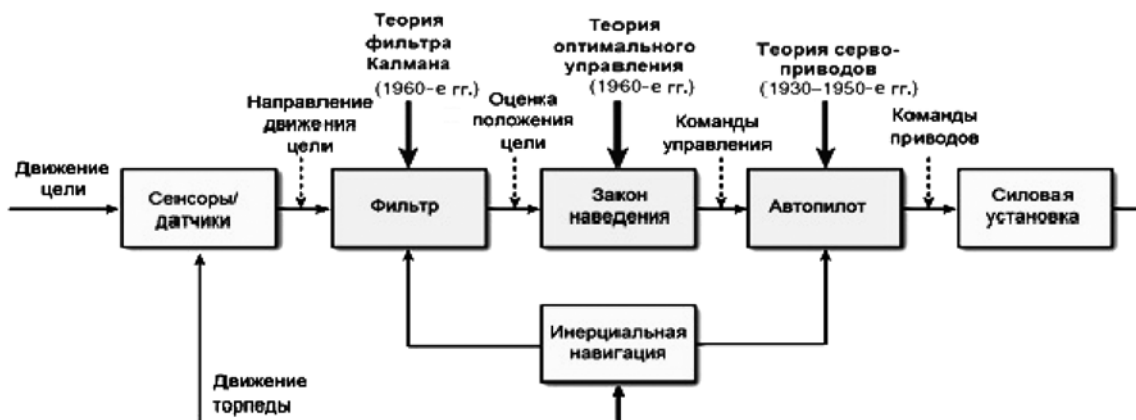


Рис. 14. Традиционная топология наведения, навигации и управления для управляемой торпеды
Fig. 14. Traditional guidance, navigation and control topology for a guided torpedo

(и при некоторых других предполагаемых условиях). Характер обратной связи закона наведения при самонаведении позволяет торпедой корректировать неточные прогнозы маневра цели и другой немодулированной динамикой (как показано на рис. 14). Отметим, что требование повышения производительности продолжает стимулировать разработчиков оптимальных законов наведения, частично заставляя учитывать (включать) более подробную динамику перехватчиков и их целей [17–23], что значительно усложняет задачу противодействия ССН ТО.

Для обеспечения эффективного противодействия ССН торпед, особенно при залпе, необходимы согласованные действия мехатронных систем ГПД (агентов). При этом следует иметь в виду, что централизованное управление системами ГПД по акустическому каналу практически невозможно вследствие высокого уровня помехи, формируемой самими системами ГПД. Оптический канал имеет весьма малый радиус действия и неприемлем для координации действия систем ГПД на удалении сотни метров. Для такой системы не может быть централизованного органа (лидера) управления поведением каждого агента. При этом локальные и, в достаточной степени, случайные взаимодействия устройств ГПД должны привести к возникновению "квазиинтеллектуального" глобального поведения всей системы противодействия ТО.

Задача совместного использования мехатронных систем для организации эффективного противодействия скоординированному действию торпед противника относится к области решения задачи в условиях противодействия и неполноты информации (PP/TP, PP — path planning; TP — trajectory planning) [16, 17].

Решение данной задачи должно привести к созданию методов и алгоритмов совместного применения мехатронных устройств и поиска их оптимальных траекторий при противодействии одиночному или скоординированному действию торпед противника.

В общем случае задачи в условиях противодействия и неполноты информации решаются следующими методами:

- планирование миссий управляемых объектов, в том числе и групповые;
- дифференциальные игры, в том числе с ложной целью и АТД.

При этом критериями задач в различных постановках выступают:

- ресурсные критерии;
- вероятностные критерии;
- информационные критерии;
- временные критерии;
- точностные критерии;
- гибридные критерии;
- векторные критерии.

Перейдем к математической формализации проблемы. Будем считать, что ставится задача противодействия одиночной торпедой. Известный алгоритм ССН торпеды позволяет оценивать направление ее движения при наличии искусственных помех. Пусть решающее правило определяет положение цели $\hat{r}(t)$ при ее реальном нахождении в точке $r(t)$ в некоторой декартовой системе координат. Текущие положения мехатронных устройств будем задавать векторами $r_i(t)$, $i = 1, \dots, N$, где N — число мехатронных устройств, а положение торпеды — вектором $r_0(t)$. Тогда решающее правило будет иметь вид

$$\hat{r}(t) = \Phi(r(t), r_0(t), r_1(t), \dots, r_N(t)). \quad (1)$$

Для описания движения цели и мехатронных устройств можно использовать упрощенные модели динамики этих объектов, считая что

$$r(t) = \phi(r(t), r_0(t), r_1(t), \dots, r_N(t), u(t)), \quad (2)$$

$$r_i(t) = u_i(t), \quad (3)$$

где $u(t)$, $u_i(t)$ — управления цели и мехатронных устройств соответственно.

При реализации догонной траектории торпеды управляется по закону

$$r_0(t) = v_0 \frac{\hat{r} - r_0}{|\hat{r} - r_0|}, \quad (4)$$

где v_0 — скорость торпеды.

Терминальным критерием задачи является расстояние между целью и торпедой в заданный момент времени T , а именно

$$R[u, u_1, \dots, u_N] = |r(T) - r_0(T)|. \quad (5)$$

Задача оптимизации заключается в максимизации критерия (5):

$$\max_{u, u_1, \dots, u_N} R[u, u_1, \dots, u_N] \quad (6)$$

при динамических ограничениях (1)–(4).

Данная задача может быть решена методами оптимального управления, например, при условии, что уравнение (1) является алгебраическим. На основании наблюдений вырабатываются команды по параметрам генерации электровзрывов и режимам движения каждой мехатронной системой ГПД. По сути, это одноранговая самоорганизующаяся сеть, характерной особенностью которой является способность агентов к коллективному поведению при решении общей целевой задачи и взаимодействию между собой для решения этой задачи [18]. Приведенная общая модель может быть использована в имитационном моделировании после конкретизации динамики системы, способов наблюдения и правил управления. Имитационное моделирование позволяет сравнивать разные способы управления носителем и источниками широкополосных помех при заданном управлении ТО и выбирать наиболее приемлемые сценарии поведения в задаче противодействия ТО. Другие задачи требуют дополнительных исследований и разработки методов их решения. В виду высокой сложности задачи рассчитывать на получение аналитического решения не приходится. Однако

можно конкретизировать классы функций, внутри которых происходит поиск управлений, и с помощью имитационного моделирования и поиска экстремума на вещественных пространствах найти некоторые субоптимальные решения.

Другое допустимое упрощение — дискретизация исходной задачи. Вместо непрерывных функций, определенных на континууме значений времени t , рассмотрим значения всех определенных ранее функций в моменты времени $\{t_i\}$, $i = 0, 1, \dots, K$, $i = 0, 1, 2, \dots, K$, которые, например, могут быть выбраны из множества моментов, в которые проводятся измерения. Тогда дифференциальные уравнения заменятся на конечноразностные, а задача оптимизации любого из функционалов станет задачей конечномерной оптимизации, для решения которой разработано большое число методов. Если временные промежутки $t_i - t_{i-1}$, $i = 1, \dots, K$, $i = 0, 1, 2, \dots, K$, невелики, можно считать, что каждый из объектов движется по отрезку прямой при $t \in [t_{i-1}; t_i]$, $i = 1, \dots, K$, $i = 0, 1, 2, \dots, K$. В таком случае траектории движения объектов будут представлять собой K -звенные ломаные, а вычисления, возникающие при применении методов оптимизации, могут быть проведены аналитически, и задача оптимизации может быть сведена к решению серии СЛАУ, что позволяет надеяться на ускорение вычислений. Это важно в связи с ограниченностью энергоресурсов рассматриваемых объектов и времени на принятие решения.

Пример сценария применения

В данном сценарии рассматривается случай атаки одиночной торпеды на носитель, который движется под углом к оси X . В задаче перехвата важно соотношение скоростей рассматриваемых объектов. Скорость торпеды (Атакующего) v_A выше скорости носителя (Цели) v_T и скорости автономных источников шумов (Защитников) v_D , причем скорость Цели выше скорости Защитника:

$$v_A = 15 \text{ м/с}; v_D = 5 \text{ м/с}; v_T = 10 \text{ м/с}.$$

ССН торпеды реагирует на первичное акустическое поле объектов и в начале атаки во всех сценариях сосредоточена на шуме носителя. Рассматривается моделирование для простейших физических моделей распростране-

Уровень шума, дБ

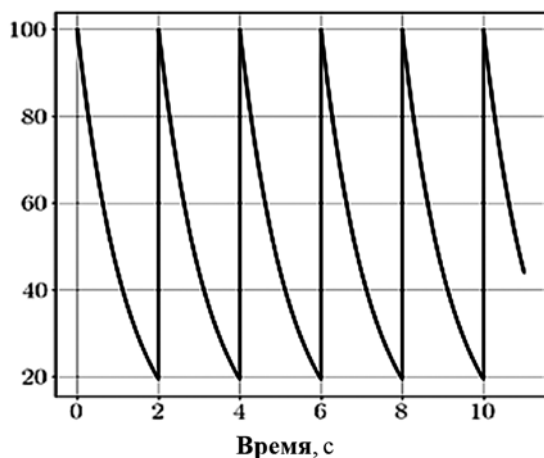


Рис. 15. Зависимость излучаемого Защитником шума от времени
Fig. 15. Dependence of the noise on time

ния сигналов в среде и динамических моделей движения подводных объектов, которое тем не менее дает понять перспективность предлагаемого подхода и тактик применения устройств.

Гидроакустический сигнал, излучаемый носителем, считается постоянным и равным 60 дБ. Сигнал, непрерывно излучаемый Защитником, представляет собой гидроакустические импульсы с постоянным периодом 2 с, интенсивность которых меняется по экспоненциальному закону за эти 2 с от 100 до 20 дБ. Зависимость такого сигнала от времени приведена на рис. 15.

Полагаем, что в среде сигналы затухают обратно пропорционально квадрату расстояния. Предлагаемая тактика защиты состоит в запуске в разные моменты времени носителем двух

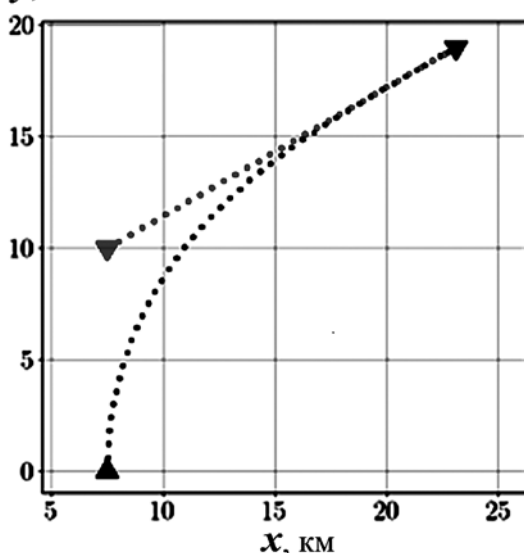
устройств, которые должны обмануть ССН торпеды, тем самым дав возможность носителю избежать атаки и покинуть район действия средств. Начальное расстояние между торпедой и носителем равно $S_0 = 10$ км. Полное время моделирования $T = 30$ мин, что соответствует запасу топлива торпеды.

Результаты моделирования приведены на рис. 16. На графике слева показан случай в отсутствие устройств защиты, а справа — в случае их применения. Видно, что наличие защитников позволяет носителю избежать уничтожения. Выбором моментов запуска и направления движения мехатронных устройств можно добиться и лучшего результата, решая задачу оптимизации, поставленную ранее.

Закключение

В статье предложен подход к организации противодействия ТО вероятного противника на основе совместного применения мехатронных устройств, использующих явление электровзрыва для противодействия ССН ТО и решающих групповую задачу управления в целях защиты МПО от поражения. Приведенный класс задач предполагает использование атакуемым мехатронных устройств, играющих роль мобильных защитников, в качестве которых может выступать как самоходный источник помех, отвлекающий на себя атакующий объект (ракету или торпеду) путем

У, км



У, км

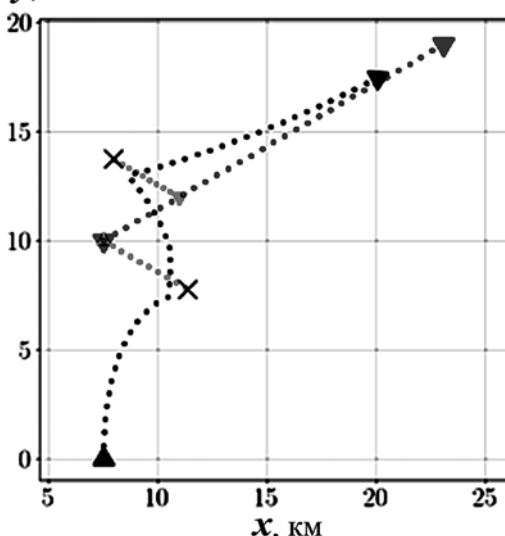


Рис. 16. Траектории движения объектов
Fig. 16. Object movement trajectories

его перехвата, так и ударный РТК, направленный на уничтожение опасного объекта. Характерной особенностью рассмотренных задач является неполнота априорной информации о дистанции до атакующего объекта и возможность мгновенного использования активных средств. Показано, что наличие даже только второго защитника целесообразно, так как значительно увеличивает время перехвата по сравнению со случаем лишь одного защитника. Также дополнительный защитник увеличивает вероятность выбора для промежуточного преследования именно одного из защитников вместо основной цели. При заданных в рассмотренных моделях условиях по стартовым позициям, скоростям и запасу хода в случае реального отвлечения торпеды на защитников при следовании построенным схемам выпуска защитников торпедой не хватит запаса топлива на поражение основной цели.

Список литературы

1. "Военная доктрина Российской Федерации" (утв. Президентом РФ 25.12.2014 N Пр-2976).
2. Аничкина Т. Б., Есин В. И. Стратегическое ядерное оружие Российской Федерации // Россия и Америка в XXI веке. 2015. № 1. С. 1.
3. Савин Л. В. Сетевая война. Введение в концепцию. М.: Евразийское движение. 2011. 130 с.
4. Жемчужин Е. Ф., Сильников М. В. Системы наведения торпедного оружия ВМС США // Вопросы оборонной техники. 2020. Т. 16. № 9—10. С. 88—93.
5. Кислов Ф. Основные тенденции развития торпедного оружия ВМС стран НАТО // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 7. С. 46—52.
6. Луцкий А. О противоторпедной защите российских подводных лодок. URL: torwar.ru (дата обращения: 10 декабря 2013).

7. Климов М. Об облике современных торпед подводных лодок // Арсенал Отечества. 2015. № 1. (15).
8. Нарращивание средств "подводной войны" // Военно-промышленный курьер. 30.01.2012.
9. Гидроакустический комплекс AN/SQR-19 // Военное оружие и армии мира. URL: <http://warfor.me>
10. Климов М. Морское подводное оружие: проблемы и возможности // Военно-промышленный курьер. Ч. I. 06.06.2010; Ч. II. 09.06.2010.
11. Степанов А. Основные направления применения искусственного интеллекта в вооруженных силах ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 1. С. 30—35.
12. Лаврентьев Э. В., Кузян О. И. Взрывы в море. Л.: Судостроение, 1977. 157 с.
13. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
14. Каляев И. А. Догнать и перегнать. О гонке суперкомпьютеров в мире // Научная Россия. URL: Scientificrussia.ru (дата обращения: 03.05.2021).
15. Малогабаритный противолодочный комплекс "Пакет-Э/НК" с аниторпедой. URL: <http://bastion-karpenko.ru/paket/>
16. Малогабаритная тепловая противолодочная торпеда MMT / торпеда-компонент комплекса "Пакет". URL: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-482.html>
17. Galyaev A. A., Lysenko P. V., Yakhno V. P. 2D Optimal Trajectory Planning Problem in Threat Environment for UUV with Non-Uniform Radiation Pattern // Sensors. 2021. Vol. 21, Iss. 2. P. 396.
18. Palumbo N. F., Blauwkamp R. A., Lloyd J. M. Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // HOMING MISSILE GUIDANCE AND CONTROL. 2010. Vol. 29. P. 1.
19. Rubinovich E. Ya. Two Targets Pursuit-Evasion Differential Game with a Restriction on the Targets Turning // IFAC-PapersOnLine. 2018. P. 503—508.
20. Rubinovich E. Ya. Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // Dynamic Games and Applications. 2019. Vol. 9. P. 851—857.
21. Eloy G., Casbeer D. W., Pachter M. Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // IET Control Theory and Applications. 2017. Vol. 17, N. 11. P. 2985—2993.
22. Galyaev A. A., Lysenko P. V., Rubinovich E. Y. Optimal Stochastic Control in the Interception Problem of a Randomly Tacking Vehicle // Mathematics. 2021. N. 9(19). P. 2386.
23. Buzikov M. E., Galyaev A. A. Minimum-time lateral interception of a moving target by a Dubins car // Automatica. 2022. Vol. 135. P. 109968.

Joint Use of Mechatronic Systems to Organize Effective Counteraction to the Coordinated Action of Enemy Torpedoes

S. N. Vassilyev¹, vassilyev_sn@mail.ru, A. A. Galyaev¹, galaev@ipu.ru, V. V. Zaletin², vzaletin@mail.ru,
K. S. Kulakov², kulakov@npo-sm.ru, M. V. Silnikov², director@npo-sm.ru,
E. I. Yakushenko², yakushenko@npo-sm.ru,

¹ V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117997, Russian Federation,

² NPO Special Materials, St. Petersburg, 194044, Russian Federation

Corresponding author: Galyaev Andrey A., Corresponding Member of RAS, Dr. of Eng., V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation, e-mail: galaev@ipu.ru

Accepted on 11 December, 2021

Abstract

The article proposes an approach to the organization of counteraction to the probable enemy on the basis of the joint use of mechatronic devices using the phenomenon of electric explosion to counteract homing systems and solving a group control

task in order to protect the target from defeat. The above class of tasks involves the use by the attacked of mechatronic devices that play the role of mobile defenders, in the quality of which can act as a self-propelled source of interference, distracting the attacking object (missile or torpedo) by intercepting it, and a shock RTK aimed at destroying a dangerous object. A characteristic feature of the considered tasks is the incompleteness of a priori information about the distance to the attacking object and the possibility of instant use of active means. It is shown that the presence of even only a second defender is advisable, since it significantly increases the interception time compared to the case of only one defender. Also, an additional defender increases the probability of choosing one of the defenders for the intermediate pursuit instead of the main target. Under the conditions set in the considered models for starting positions, speeds and power reserve, in the case of a real torpedo attack on defenders, when following the constructed schemes for the release of defenders, the torpedo will not have enough fuel to defeat the main target. The methods of interference formation based on electric explosion are considered. It is proposed to use mechatronic hydroacoustic counteraction devices capable of moving in an aquatic environment and creating broadband interference of a given intensity as such sources. A model example of the use of mechatronic devices in a given scenario is considered.

Keywords: electric explosion, mechatronic devices of hydroacoustic counteraction, group control, homing system

For citation:

Vassilyev S. N., Galyaev A. A., Zaletin V. V., Kulakov K., Silnikov M. V., Yakushenko E. I. Joint Use of Mechatronic Systems to Organize Effective Counteraction to the Coordinated Action of Enemy Torpedoes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 197–208.

DOI: 10.17587/mau.23.197-208

References

1. **Military** Doctrine of the Russian Federation (approved by the President of the Russian Federation on December 25, 2014 N Pr-2976) (in Russian).
2. **Anichkina T. B., Esin V. I.** Strategic nuclear weapons of the Russian Federation, *Russia and America in the XXI century*, 2015, no. 1, pp. 1 (in Russian).
3. **Savin L. V.** Network-centric and network warfare. Introduction to the concept, Moscow, Eurasian Movement, 2011, 130 p. (in Russian).
4. **Zhemchuzhin E. F., Silnikov M. V.** Torpedo weapon guidance systems of the US Navy, *Issues of defense technology*, 2020, vol. 16, no. 9–10, pp. 88–93 (in Russian).
5. **Kislov F.** The main trends in the development of torpedo weapons of the Navy of NATO countries, *Foreign Military Review*, 2002, no. 7, pp. 46–52 (in Russian).
6. **Lutskoy A.** On anti-torpedo protection of Russian submarines, available at: topwar.ru (date of access December 10, 2013) (in Russian).
7. **Klimov M.** About the appearance of modern torpedoes of submarines, *Arsenal of the Fatherland*, 2015, no. 1 (15) (in Russian).
8. **Building** up the means of "underwater warfare", *Military-industrial courier*, 30.01.2012 (in Russian).
9. **AN/SQR-19** Hydroacoustic complex, *Military weapons and armies of the world*, available at: http://warfor.me (in Russian).
10. **Klimov M.** Marine underwater weapons: problems and opportunities, *Military-industrial courier*, part I. 06.06.2011; part II. 09.06.2010 (in Russian).
11. **Stepanov A.** The main directions of the use of artificial intelligence in the armed forces of leading foreign countries, *Foreign Military Review*, 2021, no. 1, pp. 30–35 (in Russian).
12. **Lavrentiev E. V., Kuzyan O. I.** Explosions at sea, Leningrad, Shipbuilding, 1977, 157 p.
13. **Yutkin L. A.** Electrohydraulic effect and its application in industry, Leningrad, Mechanical Engineering, 1986, 253 p.
14. **Kalyaev I. A.** Dognat' i peregnat'. O gonke superkomp'terov v mire, *Nauchnaya Rossiya*. available at: Scientificrussia.ru (date of access 03 may 2021) (in Russian).
15. **Small-sized** anti-submarine complex "Package -E/NK" with an anti-torpedo, available at: http://bastion-karpenko.ru/paket/
16. **Small-sized** thermal anti-submarine torpedo MM / torpedo is a component of the Package complex, available at: http://militaryrussia.ru/blog/topic-482.html.
17. **Galyaev A. A., Lysenko P. V., Yakhno V. P.** 2D Optimal Trajectory Planning Problem in Threat Environment for UUV with Non-Uniform Radiation Pattern, *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 2, p. 396.
18. **Palumbo N. F., Blauwkamp R. A., Lloyd J. M.** Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques, *HOMING MISSILE GUIDANCE AND CONTROL*, 2010, vol. 29, p. 1.
19. **Rubnovich E. Ya.** Two Targets Pursuit-Evasion Differential Game with a Restriction on the Targets Turning, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, pp. 503–508.
20. **Rubnovich E. Ya.** Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information, *Dynamic Games and Applications*, 2019, vol. 9, pp. 851–857.
21. **Eloy G., Casbeer D. W., Pachter M.** Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender, *IET Control Theory and Applications*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 2985–2993.
22. **Galyaev A. A., Lysenko P. V., Rubnovich E. Y.** Optimal Stochastic Control in the Interception Problem of a Randomly Tacking Vehicle, *Mathematics*, 2021, no. 9(19), p. 2386.
22. **Buzikov M. E., Galyaev A. A.** Minimum-time lateral interception of a moving target by a Dubins car, *Automatica*, 2022, vol. 135, p. 109968.

У Цюе, аспирант, 2177223630@qq.com, М. Ю. Рачков, д-р техн. наук, проф., michyur@gmail.com, Московский политехнический университет

Расчет и оптимизация работы механизма реконфигурации колесно-гусеничного мобильного робота

Рассмотрена актуальная задача создания транспортного автономного робота для работы в неструктурированной среде и в условиях чрезвычайных ситуаций. Конструкция робота содержит комбинированную систему движителей, состоящую из трансформируемых гусеничных и колесных групп, которая позволяет перемещаться по различным видам поверхностей, включая условия урбанистического окружения, где необходимо преодолевать препятствия сложной конфигурации, включая лестничные марши. Движение по ровной поверхности осуществляется только колесными группами с втянутыми выдвижными элементами при поднятых гусеничных группах, что обеспечивает повышенную скорость движения устройства. Движение по неровной поверхности осуществляется только гусеничными группами, при этом колесные движители подняты, что обеспечивает повышенную проходимость по сравнению с ровной поверхностью. Лестничные марши и препятствия сложной геометрической формы могут преодолеваться при одновременном использовании колесных и гусеничных групп, при этом угол положения колесных групп относительно гусеничных групп при реконфигурации робота определяется размерами и формой ступеней лестничного марша и препятствий. Блок реконфигурации робота выполнен в виде рычажного устройства с электрическими цилиндрами, имеющего возможность самоблокировки. Он реализует переключение колесного и гусеничного режимов движения робота, а также подъем колесной группы на требуемый угол при преодолении препятствий. Проведен анализ конструкции и расчет рычажного механизма колесно-гусеничной мобильной платформы. Разработана кинематическая модель блока реконфигурации. Получены соотношения между углами и длинами рычагов, а также взаимосвязь между угловой скоростью перемещения рычагов и скоростью движения толкателя электрического цилиндра рычажного механизма. Оптимизация работы блока реконфигурации проведена путем создания его математической модели для программирования в пакете MATLAB. Определена целевая функция и ограничения на работу системы. В результате моделирования получены улучшенные механические характеристики блока реконфигурации, дающие возможность более точного управления при снижении требуемых усилий исполнительного механизма.

Ключевые слова: транспортный робот, колесно-гусеничная конструкция, блок реконфигурации, рычажный механизм, кинематическая модель, оптимизация

Введение

В условиях чрезвычайных ситуаций, например при пожарах, и при проведении опасных для человека операций, таких как разминирование, необходимо доставить соответствующее технологическое, инспекционное или спасательное оборудование в рабочую зону в автоматическом режиме. Удобным решением задачи является использование транспортных роботов, имеющих соответствующее оборудование на своем борту.

Схемы транспортных автономных платформ для работы в неструктурированной среде и в чрезвычайных ситуациях, в частности для операций разминирования, рассматривались в работах [1–4]. Существуют транспортные роботы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций, имеющие гусеничные группы и платформу для установки бортового оборудования [5–8]. Эти роботы имеют возможность перемещения в неизвестных или внедорожных условиях, однако не могут преодолевать препятствия, в частности, сравнимые с высотой гусеничных групп, а также

не в состоянии перемещаться по ступенькам лестничного марша. Из-за отсутствия колес они обладают низкой скоростью движения по ровным поверхностям, что часто необходимо для самостоятельного быстрого попадания робота в зону проведения работ с места дислокации по магистралям.

Эти недостатки отсутствуют в колесно-гусеничных конструкциях мобильных роботов, которые позволяют перемещаться по различным видам поверхностей, включая условия урбанистического окружения, где необходимо преодолевать препятствия сложной конфигурации, например лестничные марши [9]. Такие роботы имеют возможность двигаться на ровных поверхностях со скоростью, превышающей скорость перемещения транспортных средств, оборудованных движителями только гусеничного типа, а также сохраняют ресурс гусеничных траков, подверженных износу при движении по твердым поверхностям, таким как асфальт или бетон. При этом не повреждаются сами магистрали. Эти конструкции обладают широкими возможностями для движения по пересеченной местности со сложным

рельефом, а также для преодоления препятствий различной формы, в том числе с высотой большей, чем высота гусеничных групп.

В настоящее время разрабатываются различные механизмы реконфигурации автоматических систем, в частности, в Шэньянском институте автоматизации в Китае [10–21]. Однако структура этих механизмов сложная и трудно управляемая, что снижает надежность функционирования робота. В данной работе предлагается использовать блок для реконфигурации робота в виде шарнирного устройства с электрическими цилиндрами, которое дает возможность гибкого и надежного управления движением робота в зависимости от конкретной ситуации.

Конструкция мобильного робота

Конструкция робота содержит комбинированную систему движителей, состоящую из трансформируемых гусеничных и колесных групп (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Робот имеет два гусеничных движителя, расположенных по бокам платформы для оборудования, и два колесных движителя, установленных спереди и сзади платформы между гусеничными группами [4]. Блок реконфигурации позволяет трансформировать робота для преодоления различных препятствий (рис. 2, см. третью сторону обложки). Движение по ровной поверхности осуществляется только колесными группами с втянутыми выдвижными элементами при поднятых гусеничных группах, что обеспечивает повышенную скорость движения устройства (рис. 2, а). Движение по неровной поверхности осуществляется только гусеничными группами (рис. 2, б), при этом колесные движители подняты, что обеспечивает повышенную проходимость по сравнению с ровной поверхностью. Лестничные марши и препятствия сложной геометрической формы могут преодолеваться при одновременном использовании колесных и гусеничных групп, при этом угол положения колесных групп относительно гусеничных групп определяется размерами и формой ступеней лестничного марша и препятствий (рис. 2, в).

Блок реконфигурации робота

Блок реконфигурации робота, выполненный в виде шарнирного устройства с электрическими цилиндрами, показан на рис. 3.

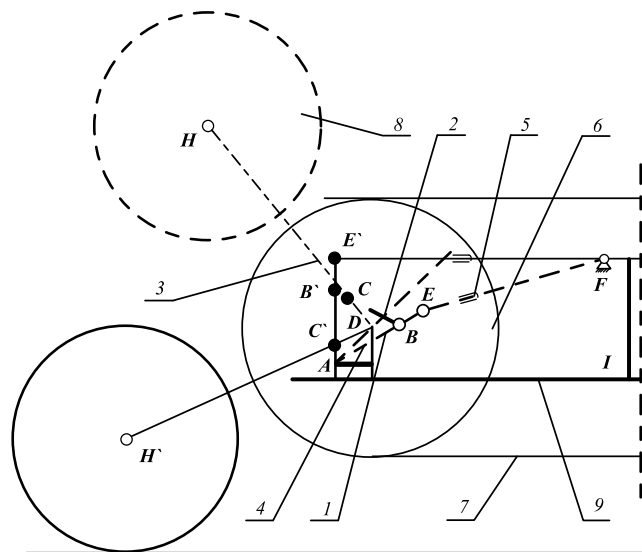


Рис. 3. Блок реконфигурации робота:

1 — поворотный рычаг; 2 — шатун; 3 — колесный рычаг; 4 — основание; 5 — электрический цилиндр; 6 — колесо гусеничной группы; 7 — гусеница; 8 — колесо колесной группы; 9 — платформа робота

Fig. 3. Robot reconfiguration block:

1 — swing lever; 2 — connecting rod; 3 — wheel lever; 4 — base; 5 — electric cylinder; 6 — track wheel; 7 — caterpillar; 8 — wheel of the wheel group; 9 — robot platform

Когда режим движения переключается с гусеничного на колесный, толкатель электрического цилиндра выдвигается, толкая поворотный рычаг и организуя вращение вокруг точки A. Поворотный рычаг приводит в движение шатун, который толкает колесный рычаг. После того как толкатель полностью выдвинут, поворотный рычаг находится в вертикальном положении. В это время шатун блокирует рычажное устройство. Вибрации при движении робота воспринимаются шатуном в вертикальном направлении, что предотвращает повреждение электрического цилиндра. Когда режим движения переключается с колесного на гусеничный, толкатель электрического цилиндра втягивается, и последовательность движения меняется на обратную. После завершения движения рычажное устройство снова блокируется.

Упрощенная кинематическая модель механизма показана на рис. 4.

В системе координат $x'Ay'$ обозначим длину поворотного рычага l_{AB} , длину шатуна l_{BC} , длину колесного рычага l_{DC} и расстояние между поворотными сочленениями l_{AD} . Для этих значений запишем замкнутое векторное уравнение:

$$l_{AB}e^{i\varphi_1} + l_{BC}e^{i\varphi_2} = l_{AD} + l_{DC}e^{i\varphi_3}, \quad (1)$$

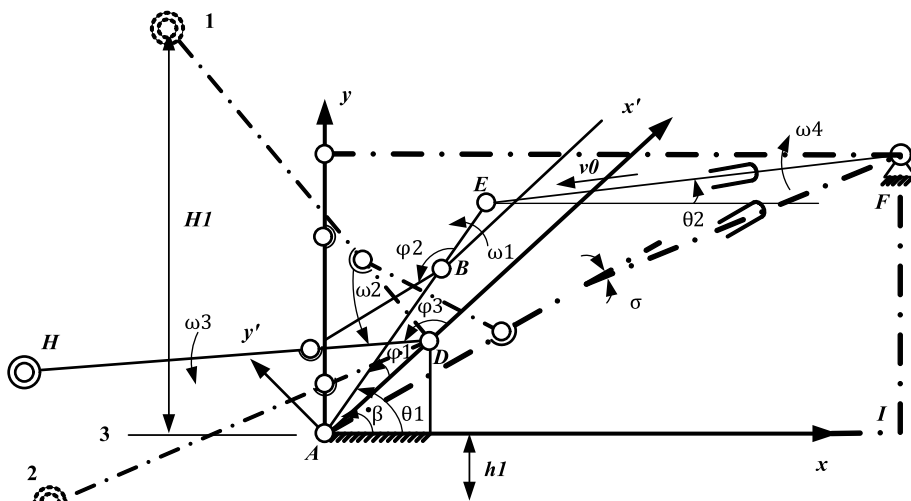


Рис. 4. Кинематическая модель механизма:

EF — телескопическая тяга привода; 1 — верхнее положение колеса; 2 — нижнее положение колеса; 3 — уровень платформы

Fig. 4. Kinematic model of the mechanism:

EF — telescopic drive rod; 1 — upper wheel position; 2 — lower wheel position; 3 — platform level

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ — углы между колесным рычагом, шатуном, поворотным рычагом и осью x' .

Из уравнения (1) получим следующие соотношения:

$$\varphi_3 = 2 \arctan \frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a - c}, \quad (2)$$

$$\text{где } a = l_{AD} - l_{AB} \cos \varphi_1; \quad b = -l_{AB} \sin \varphi_1; \\ c = \frac{a^2 + b^2 + l_{DC}^2 - l_{BC}^2}{2l_{DC}}.$$

Соотношение между углами и длинами рычагов можно получить в системе координат xAy :

$$\varphi_1 = \theta_1 - \beta; \\ l_{EF} = l_0 + \delta, \quad (3)$$

где l_0 — номинальная длина электрического цилиндра; δ — длина выдвижения электрического цилиндра.

Разница высот между самой низкой точкой колеса и самой нижней точкой гусеницы определяется как

$$h = l_{DH} \sin(\varphi_3 + \beta) - r + R, \quad (4)$$

где r — радиус колеса колесной группы; R — радиус колеса гусеницы; l_{DH} — длина колесного рычага. При колесном режиме движения знак h положительный, а при гусеничном режиме — отрицательный.

Соотношение для угловой скорости может быть получено из уравнения (1) путем дифференцирования:

$$\omega_1 = \frac{v_0}{l_{AE}(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (5)$$

где v_0 — скорость движения толкателя электрического цилиндра,

$$\omega_3 = \omega_1 \frac{l_{AB}(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_{DC}(\varphi_3 - \varphi_2)}. \quad (6)$$

Полученные соотношения описывают взаимосвязь элементов конструкции, и их можно использовать для управления колесными рычагами при соответствующей реконфигурации робота.

Оптимизация режима реконфигурации

Оптимизация работы блока реконфигурации проводится путем создания его математической модели для программирования в пакете *MATLAB*.

Переменные модели можно записать как

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_6]^T = \\ = [l_{AB}, l_{BC}, l_{DC}, l_{AD}, l_{AE}, l_{IF}]^T. \quad (7)$$

В момент, когда поворотный рычаг находится в вертикальном положении вместе с шатуном, выполняется условие: $\varphi_2 = 3\pi/2 - \beta$, которое вытекает из уравнения (1). Целевая функция при этом определяется как

$$\min F_1(x_i) = |\varphi_2 - (3\pi/2 - \beta)|. \quad (8)$$

Для плавного перемещения рычагов формулируется требование к угловой скорости

$$\min F_2(x_i) = |\omega_{3\max} - \omega_{3\min}|. \quad (9)$$

Предполагается, что тяга электрического цилиндра должна быть минимально достаточной. Когда механизм находится в положении 1 (рис. 4), толкатель имеет наибольшую тягу, а когда гусеница отрывается от земли, и колеса опираются на поверхность перемещения ($h = 0$), тяга максимальна.

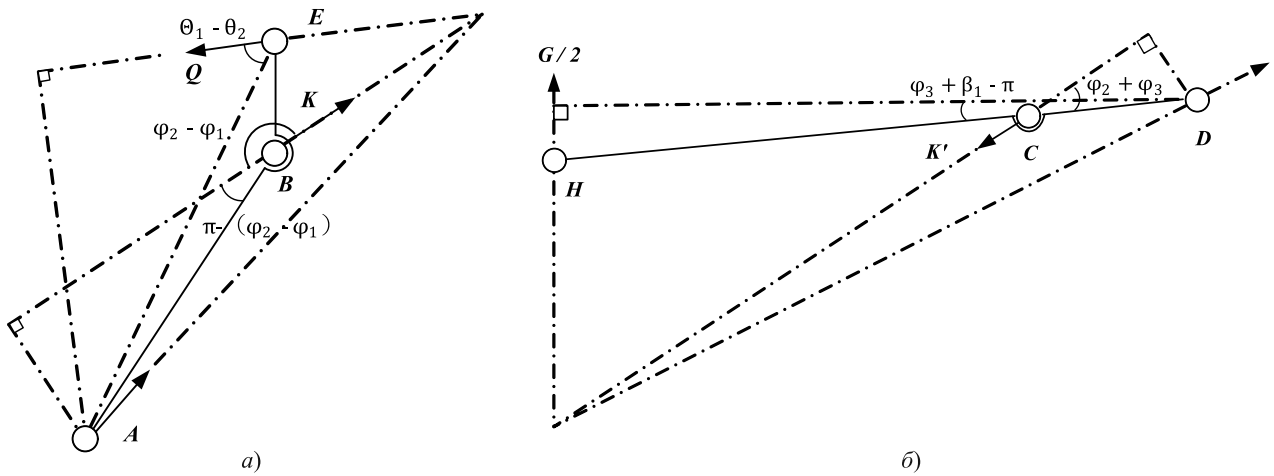


Рис. 5. Силовая диаграмма рычагов механизма:

a — шатун; *б* — колесный рычаг (*K* — сила тяги электрического цилиндра, *K'* — составляющая сила тяжести колеса)

Fig. 5. Power diagram of the mechanism levers:

a — connecting rod; *б* — wheel lever (*K* — traction force of the electric cylinder, *K'* — component of the wheel gravity)

На рис. 5 показана силовая диаграмма рычагов механизма.

Поскольку сила инерции рычагов мала, можно использовать статический анализ вместо динамического, не учитывая силу тяжести и силу инерции шатуна. Векторная сумма внешних сил и моментов точек *A* и *D* равна нулю. Для точки *A* моменты определяются через соотношения $l_{AB}\sin(\varphi_2 - \varphi_1)$ и $l_{AE}\sin(\theta_1 - \theta_2)$. Для точки *K* моменты соответственно определяются через соотношения $l_{DH}\cos(\varphi_3 + \beta)$ и $l_{CD}\sin(\varphi_2 + \varphi_3)$. Статический баланс сил при общем весе робота *G* определяется как

$$Ql_{CD}\sin(\varphi_2 + \varphi_3)l_{AE}\sin(\theta_1 - \theta_2) = \frac{G}{2}l_{DH}\cos(\varphi_3 + \beta)l_{AB}\sin(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (10)$$

Отсюда получаем

$$Q = \frac{G}{2} \frac{l_{DH}(\varphi_3 + \beta)l_{AB}\sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{l_{CD}(\varphi_2 + \varphi_3)l_{AE}\sin(\theta_1 - \theta_2)}. \quad (11)$$

Когда колеса касаются поверхности перемещения и поднимают платформу, действует сила тяги *Q* электрического цилиндра. Когда колеса подняты, а гусеницы касаются поверхности перемещения, возникает сила натяжения *q*. Для силы тяги можно записать $\min F_3(x_i) = Q_{\max}$, а для силы натяжения имеем $\min F_4(x_i) = q_{\max}$.

Таким образом, общая целевая функция оптимальной конструкции блока реконфигурации запишется как

$$F(x_i) = \mu_1 F_1(x_i) + \mu_2 F_2(x_i) + \mu_3 F_3(x_i), \quad (12)$$

где μ_1, μ_2, μ_3 — весовые коэффициенты, сумма которых равна 1.

К ограничениям в модели относится высота платформы, которая в режиме движения на колесах должна соответствовать условию $|h_{\min}| \geq h_1$. В режиме гусеничного движения высота подъема колеса должна соответствовать условию $|h_{\max}| \geq H_1$. В гусеничном режиме электрический цилиндр в конечном положении должен находиться под определенным углом не параллельно шатуну, а расчетный угол σ не должен быть меньше $\sigma_{\max}$. Таким образом, математическую модель можно записать как

$$\begin{cases} \min F(x_i); \\ l_{AB} < l_{AE}; \\ l_{BC} < l_{AB}; \\ l_{DC} < l_{AD}; \\ l_{AD} < l_{AB} - l_{BC} + l_{DC}; \\ -\sigma \leq -\sigma_{\max}; \\ l_{AE} = l_{IF}; \\ l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}; \\ -|h_{\min}| \leq -h_1; \\ -|h_{\max}| \leq -H_1. \end{cases} \quad (13)$$

Так как стандартная высота и ширина лестничной ступени равна 160x260 мм, то для моделирования выбираем $160 \text{ мм} \leq |h_{\max}|$, $180 \text{ мм} \leq |h_{\min}|$. Сила тяги электрического цилиндра составляет 6000 Н, $\delta_{\max} = 100 \text{ мм}$, $l_0 = 205 \text{ мм}$. Разница хода между начальной длиной и максимальным удлинением толкателя электрического цилиндра составляет 105 мм,

следовательно, $l_0 = \delta_{\max} = 105$. Зададим остальные параметры как $r = 127$ мм, $R = 142$ мм, $\beta = 45^\circ$, $G = 1200$ Н, $v_0 = 12$ мм/с, $\mu_1 = 0,8$, $\mu_2 = 0,1$, $\mu_3 = 0,1$.

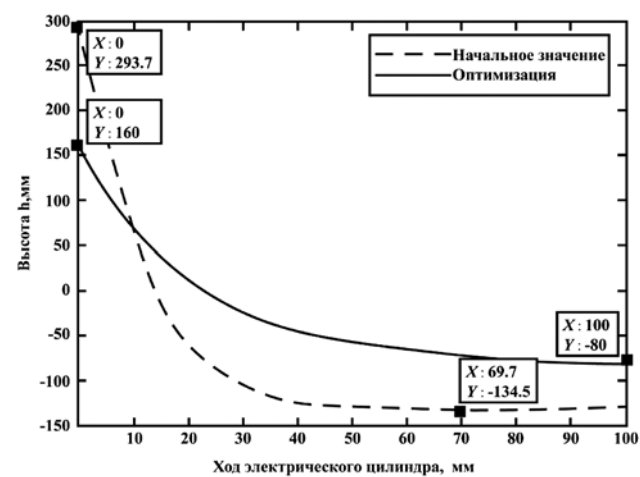


Рис. 6. Управление высотой подъема колесной группы
Fig. 6. Lifting height control of the wheel group

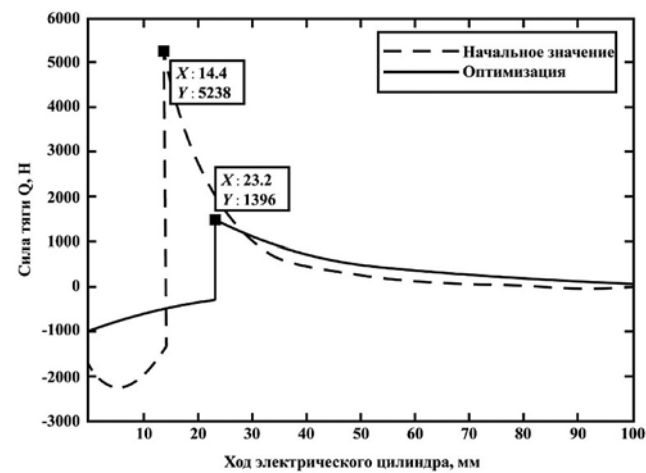


Рис. 7. Оптимизация силы тяги электрического цилиндра
Fig. 7. Traction force optimization of the electric cylinder

Сравнительные значения параметров конструкции
Comparative values of design parameters

Оптимизируемый параметр	Начальное значение, мм	Оптимальное значение, мм	Заданный параметр	Значение параметра
l_{AB}	80	95,5	l_{DH}	290 мм
l_{BC}	60	65,1	l_{AI}	305 мм
l_{DC}	42	49,2	l_0	205 мм
l_{AD}	58	65,8	β	45°
l_{AE}	126	145,6	$\sigma_{\max}$	100 мм
l_{iF}	126	145,6	r	142 мм
			R	1200 мм
			G	1200 Н

С помощью инструментария оптимизации *MATLAB* указанная выше математическая модель преобразуется программным путем. Значение каждого параметра получено путем ввода в программу оптимизируемых параметров, как показано в таблице, где оптимизированное значение определено до первого десятичного разряда.

Результаты моделирования работы блока реконфигурации с начальными и оптимизированными значениями приведены на рис. 6 при управлении высотой подъема колесной группы.

Видно, что оптимизированная кривая имеет более линейную характеристику, что дает возможность более точного управления.

На рис. 7 представлены результаты оптимизации силы тяги электрического цилиндра в зависимости от его рабочего хода.

Резкое изменение силовой характеристики происходит в момент переключения колесного режима на гусеничное движение. Оптимизация позволяет проводить управление по более гладкой характеристике и в меньшем диапазоне требуемых усилий.

Заключение

Проведен анализ конструкции и расчет рычажного механизма колесно-гусеничного мобильного робота. На базе типового рычажного устройства с возможностью самоблокировки построен блок реконфигурации мобильного робота, реализующий переключение колесного и гусеничного режимов его движения. Разработана кинематическая модель блока реконфигурации и предложен метод оптимизации параметров рычажного механизма. В результате моделирования получены улучшенные механические характеристики блока реконфигурации, дающие возможность более точного управления при снижении требуемых усилий исполнительного механизма.

Список литературы

1. Magnenat S., Philippsen R., Mondada F. Autonomous construction using scarce resources in unknown environments // Autonomous robots. Springer Science. Vol. 33. 2012. P. 467—485.
2. Rachkov M., Marques L., de Almeida A. T. Multisensor demining robot // Autonomous robots. Springer Science. 2005. Vol. 18, N.3. P. 275—291.
3. Rachkov M. Modelling of Demining Manipulator Optimal Functioning // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2019. Vol. 20, N.5. P. 280—290.

4. **Rachkov M., Petukhov S.** Navigation of the autonomous vehicle reverse movement // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 315.
5. **Batanov A., Gritsynin S., Murkin S.** Robotic systems for emergency applications // *Spetsialnaya Tekhnika*. 2000. № 1. P. 3–15 (in Russian).
6. **Hastie J., Jacobs B., Martell C.** et al. Development of a new for the Foster-Miller Talon Robot. MIMEU701-702. Technical Design Report. 2005.
7. **Lee C., Kim S., Kang S. et al.** Double-track mobile robot for hazardous environment applications // *Advanced Robotics*. 2003. Vol. 17, N. 5. P. 447–459.
8. **Morris A., Ferguson D., Omohundro Z.** et al. Recent developments in subterranean robotics // *Journal of Field Robotics*. 2010. Vol. 23, N. 1. P. 35–57.
9. **Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V.** Reconfigurable Autonomous Wheel-Track Robot // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia. 2019. P. 1–5.
10. **Wang W.** Study on tracked mobile robot with manipulator in complex terrain. Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese).
11. **Yunwang L., Shirong G., Hua Z.** Obstacle-surmounting mechanism and capability of four-track robot with two swing arms // *Robot*. 2010. Vol. 32, N. 2. P. 157–165 (in Chinese).
12. **Zhiqing L., Shugen M., Bin L.** Development of a transformable wheel-track robot with self-adaptive ability // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2011. Vol. 47, N. 5. P. 1–10 (in Chinese).
13. **Zonghao L., Caihong S., Shaohua K.** Design and analysis of the pose-varied wheel-tracked robot travel mechanism // *Machinery Design & Manufacture*. 2014. N. 4. P. 175–177 (in Chinese).
14. **Tulenko J.** Development of a radiation resistant Andros robot for operation in severe environments // *Proc. ANS 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*. 1995. 2(5-10). P. 165–168.
15. **Wang J., Wang T., Yao C.** A novel control law for constrained manipulation with its usage in the explosives ordnance disposal robot // *Chinese Science Bulletin*. 2013. Vol. 58 (Suppl.II). P. 91–96 (in Chinese).
16. **Stojic S.** Rubber tracksystem. Patent US 20160368551. 2016.
17. **Mo H., Shang J., Luo Z.** Trench-crossing capability analysis of a reconfigurable tracked mobile robot // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. Springer-Verlag Press, 2010. P. 509–518.
18. **Wenwei Z., Kejian W.** *Mechanical Principles*. Beijing: Higher Education Press, 1997. P. 54–57 (in Chinese).
19. **Jianjun D.** The development of kinematic error analysis system of planar linkage mechanism. Shenyang: Northeastern University, 2012.
20. **Kim Y., Kwak J., Kim J. et al.** Adaptive driving mode control of mobile platform with wheel-track hybrid type for rough terrain in the civil environment // *International Conference on Control, Automation and Systems, IEEE. Kintex*, 2010. P. 86–90.
21. **Kim J., Lee C.** Variable transformation shapes of single-tracked mechanism for a rescue robot // *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Control, Automation and Systems*. Seoul, 2007. P. 1057–1061.

Calculation and Optimization of the Wheel-Track Mobile Robot Reconfiguration Mechanism

Wu Que, 2177223630@qq.com, **M. Yu. Rachkov**, michyur@gmail.com,
Moscow Polytech, Moscow, 107023, Russian Federation

Corresponding author: Wu Que, Postgraduate Student, Moscow Polytech,
Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: 2177223630@qq.com

Accepted on 11 December, 2021

The actual problem of an autonomous transport robot design for work in an unstructured environment and in emergency situations is considered. The design of the robot contains a combined system, consisting of transformable track and wheel groups, which allows moving over different types of surfaces, including the conditions of the urban environment, in particular flights of stairs. Movement on a flat surface is carried out only by wheel groups with raised track groups, which provides an increased speed of the robot. Movement on uneven surface is carried out only by track groups, while the wheel groups are raised. It provides increased cross-country ability. Staircase and complex obstacles can be overcome with the simultaneous use of wheel and track groups at angle of the wheel groups relative to the track groups during reconfiguration of geometric shapes and steps of the staircase and obstacles. The robot reconfiguration unit is made in the form of a lever mechanism with electric cylinders, which can be self-locking. It implements the switching of the robot movement modes, as well as lifting the wheel group to the required angle for overcoming obstacles. The analysis of the design and calculation of the lever mechanism of the wheel-track robot is carried out. A kinematic model of the reconfiguration unit has been developed. Relationships between the angles and length of the levers, as well as between the angular velocity of movement of the levers and the speed of movement of the electric cylinder pusher of the lever mechanism are obtained. Optimization of the reconfiguration block operation by creating its mathematical model for programming in the Matlab package is done. The target function and restrictions on the system operation have been determined. As a result, improved mechanical characteristics of the reconstruction unit are obtained.

Keywords: transport robot, wheel-track structure, reconfiguration block, lever mechanism, kinematic model, optimization

For citation:

Wu Que, Rachkov M. Yu. Calculation and Optimization of the Wheel-Track Mobile Robot Reconfiguration Mechanism, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 209–215.

DOI: 10.17587/mau.23.209-215

References

1. Magnenat S., Philippsen R., Mondada F. Autonomous construction using scarce resources in unknown environments, *Autonomous robots*, Springer Science, 2012, vol. 33, pp. 467–485.
2. Rachkov M., Marques L., de Almeida A. T. Multisensor demining robot, *Autonomous robots*, Springer Science, 2005, vol. 18, no. 3, pp. 275–291.
3. Rachkov M. Modelling of Demining Manipulator Optimal Functioning, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, 20(5), pp. 280–290
4. Rachkov M., Petukhov S. Navigation of the autonomous vehicle reverse movement, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 315.
5. Batanov A., Gritsynin S., Murkin S. Robotic systems for emergency applications, *Spetsialnaya Tekhnika*, 2000, no. 1, pp. 3–15 (in Russian).
6. Hastie J., Jacobs B., Martell C. et al. Development of a new for the Foster-Miller Talon Robot, *MIMEU701-702. Technical Design Report*, 2005.
7. Lee C., Kim S., Kang S. et al. Double-track mobile robot for hazardous environment applications, *Advanced Robotics*, 2003;17 (5), pp. 447–459.
8. Morris A., Ferguson D., Omohundro Z. et al. Recent developments in subterranean robotics, *Journal of Field Robotics*, 2010, 23(1), pp. 35–57.
9. Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V. Reconfigurable Autonomous Wheel-Track Robot, *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia, 2019, pp. 1–5.
10. Wang W. Study on tracked mobile robot with manipulator in complex terrain, Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese).
11. Yunwang L., Shirong G., Hua Z. Obstacle-surmounting mechanism and capability of four-track robot with two swing arms, *Robot*, 2010, 32(2), pp. 157–165 (in Chinese).
12. Zhiqing L., Shugen M., Bin L. Development of a transformable wheel-track robot with self-adaptive ability, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(5), pp. 1–10 (in Chinese).
13. Zonghao L., Caihong S., Shaohua K. Design and analysis of the pose-varied wheel-tracked robot travel mechanism, *Machinery Design & Manufacture*, 2014 (4), pp. 175–177 (in Chinese).
14. Tulenko J. Development of a radiation resistant Andros robot for operation in severe environments, *Proc. ANS 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, 1995, 2(5-10), pp. 165–168.
15. Wang J., Wang T., Yao C. A novel control law for constrained manipulation with its usage in the explosives ordnance disposal robot, *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 (Suppl.II), pp. 91–96 (in Chinese).
16. Stojic S. Rubber tracksystem, *patent US 20160368551*, 2016.
17. Mo H., Shang J., Luo Z. Trench-crossing capability analysis of a reconfigurable tracked mobile robot, *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Springer-Verlag Press, 2010, pp. 509–518.
18. Wenwei Z., Kejian W. Mechanical Principles, Beijing, *Higher Education Press*, 1997, pp. 54–57 (in Chinese).
19. Jianjun D. The development of kinematic error analysis system of planar linkage mechanism, Shenyang, Northeastern University, 2012.
20. Kim Y., Kwak J., Kim J. et al. Adaptive driving mode control of mobile platform with wheel-track hybrid type for rough terrain in the civil environment, *International Conference on Control, Automation and Systems*, IEEE, Kintex, 2010, pp. 86–90.
21. Kim J., Lee C. Variable transformation shapes of single-tracked mechanism for a rescue robot, *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, 2007, pp. 1057–1061.



**KAZAN
DIGITAL
WEEK 2022**
21–24 СЕНТЯБРЯ

Кабинет Министров Республики Татарстан
под эгидой правительства Российской Федерации
21–24 сентября 2022 года
в столице Республики Татарстан г. Казани проводит

Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2022 (KDW–2022)

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ KDW–2022:

- интеллектуальные транспортные системы;
- цифровые технологии в сфере государственного и муниципального управления;
- цифровая индустрия 4.0;
- кибербезопасность нового времени;
- экосистема финтех;
- инновации, интегрированные в бизнес;
- цифровые технологии в здравоохранении и медицине;
- цифровые технологии в образовании;
- цифровые технологии в культуре;
- цифровые технологии в сфере сельского хозяйства.

Информация об условиях участия в различных мероприятиях форума, алгоритм регистрации, информация о публикации научных статей и презентаций, а также полный архив материалов KDW–2021 представлены на сайте kazandigitalweek.ru/kazandigitalweek.com.

ПРИГЛАШАЕМ К ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

Статьи принимаются в строгом соответствии с тематическими направлениями. Автор должен указать тематическое направление статьи. Все статьи проходят проверку программой "Антиплагиат" и двустороннее слепое рецензирование. После отбора экспертной группой статьи будут опубликованы в сборнике материалов форума. Возможна публикация в журналах, включенных в международную реферативную базу данных Scopus и рецензируемых ВАК, индексируемых в РИНЦ. Статьи принимаются до 1 июня 2022 года на электронный адрес: org@kazandigitalweek.ru.

Запрос об условиях участия в выставке направлять на электронный адрес: Artem.Safin@tatar.ru

Н. Е. Зубов, д-р техн. наук, проф., nezubov@bmstu.ru,
В. Н. Рябченко, д-р техн. наук, проф., ryabchenko.vn@yandex.ru,
А. В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф., pav@bmstu.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва,
ПАО РСК "Энергия" им. С. П. Королева, г. Королев МО

Об одном подходе к синтезу робастной системы стабилизации продольного движения гипотетического самолета

Для линеаризованной модели четвертого порядка продольного движения летательного аппарата самолетного типа с тремя органами управления получены аналитические выражения законов управления, обеспечивающих робастность по одному из коэффициентов модели объекта управления, имеющего наименьший диапазон разброса значений. В качестве такого коэффициента рассматривается приращение подъемной силы в зависимости от приращения угла атаки и угла наклона траектории. В основу работы положена оригинальная декомпозиция модели объекта управления и разработанный на ее основе метод модального синтеза. Поиск робастного управления базируется на параметризации множества решений и назначении собственных значений замкнутой системы. Идея этого подхода состоит в следующем. Если для заданного объекта управления найти в аналитической форме все множество законов управления с обратной связью, обеспечивающих заданное множество собственных значений, то с помощью соответствующей параметризации этого множества можно выделить подмножество робастных законов управления по отношению к тому или иному фактору. В основу получения параметризованного решения задачи синтеза было положено преобразование подобия для матрицы собственных значений нулевого уровня декомпозиции объекта управления. Приведены результаты численного моделирования управления продольным движением летательного аппарата с использованием синтезированных аналитических законов. По его результатам оценено влияние коэффициента модели, при котором для не робастного аналитического закона управления летательный аппарат в продольном движении теряет устойчивость. Отмечено, что робастный закон управления не имеет ограничений по отношению к ошибке задания рассматриваемого коэффициента модели, характеризующего приращение подъемной силы летательного аппарата в зависимости от приращения угла атаки и угла наклона траектории.

Ключевые слова: продольное движение, гипотетический летательный аппарат самолетного типа, математическая модель, декомпозиционный метод модального синтеза, система с многими входами и многими выходами (МИМО-система), робастное управление

Введение

Современные подходы к синтезу робастного управления включают обширное множество методов и подходов, среди которых выделим следующие [1, 2]: методы на основе робастных критериев устойчивости Михайлова, Найквиста и Цыпкина—Поляка; QFT-методы; методы μ -синтеза и LMI-методы; методы функций Ляпунова; методы на основе интервальных критериев устойчивости Липатова—Соколова и Харитонов; методы LQ- и L_1 -оптимизации; методы оптимизации в пространствах Харди (методы H_2 - и H_∞ -синтеза); методы, основанные на принципе глубокой обратной связи и др.

Учитывая сложность синтеза и относительно малую практическую применимость ука-

занных методов, в данной работе для задачи стабилизации продольного движения гипотетического летательного аппарата самолетного типа предлагается подход, в основу которого положен аналитический синтез с использованием декомпозиционного метода модального управления в пространстве состояний динамической системы.

Идея этого подхода состоит в следующем. Если для заданного объекта управления найти в аналитической форме все множество законов управления с обратной связью, обеспечивающих заданное множество собственных значений, то с помощью соответствующей параметризации этого множества можно выделить подмножество робастных законов управления по отношению к тому или иному фактору.

Математическая модель продольного движения самолета

Будем рассматривать линеаризованную модель летательного аппарата самолетного типа с тремя органами управления следующего вида [3]:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

с матрицами коэффициентов

$$A = \begin{pmatrix} -a_x^V & -a_x^\theta + a_x^\alpha & 0 & -a_x^\alpha \\ -a_y^V & -a_y^\theta + a_y^\alpha & 0 & -a_y^\alpha \\ a_{m_z}^V & a_{m_z}^\alpha & -a_{m_z}^{\omega_z} & -a_{m_z}^\alpha \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} a_x^P & 0 & 0 \\ 0 & a_y^{\delta_c} & a_y^{\delta_{PB}} \\ 0 & a_{m_z}^{\delta_c} & a_{m_z}^{\delta_{PB}} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

элементы которых являются кусочно-постоянными величинами, и векторами

$$x = \begin{pmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \\ \Delta \omega_z \\ \Delta \nu \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} \Delta P \\ \delta_c \\ \delta_{PB} \end{pmatrix}.$$

Здесь ΔV — отклонение модуля вектора скорости; $\Delta \theta$ — отклонение угла наклона траектории; $\Delta \omega_z$ — отклонение угловой скорости в канале тангажа; $\Delta \nu$ — отклонение угла тангажа; ΔP — отклонение модуля вектора тяги двигателя; δ_{PB} — угол отклонения руля высоты; δ_c — угол отклонения стабилизатора; $a_x^V, a_x^\theta, a_x^\alpha, a_y^V, a_y^\theta, a_y^\alpha, a_{m_z}^V, a_{m_z}^\alpha, a_{m_z}^{\omega_z}, a_x^P, a_y^{\delta_c}, a_y^{\delta_{PB}}, a_{m_z}^{\delta_c}, a_{m_z}^{\delta_{PB}}$ — коэффициенты линеаризации [3].

Введем для краткости записи обозначения $a_{11} = -a_x^V, a_{12} = -a_x^\theta + a_x^\alpha, a_{14} = -a_x^\alpha, a_{21} = -a_y^V, a_{22} = -a_y^\theta + a_y^\alpha, a_{24} = -a_y^\alpha, a_{31} = a_{m_z}^V, a_{32} = a_{m_z}^\alpha, a_{33} = -a_{m_z}^{\omega_z}, a_{34} = -a_{m_z}^\alpha, b_{11} = a_x^P, b_{22} = a_y^{\delta_{PB}}, b_{23} = a_y^{\delta_c}, b_{32} = a_{m_z}^{\delta_{PB}}, b_{33} = a_{m_z}^{\delta_c}$, тогда объект управления (1) в развернутом виде запишется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{V} \\ \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\omega}_z \\ \Delta \dot{\nu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \\ \Delta \omega_z \\ \Delta \nu \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} \\ 0 & b_{32} & b_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta \delta_{PB} \\ \Delta \delta_c \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Считая все компоненты вектора состояния полностью наблюдаемыми, будем искать

управление для модели (2) в виде закона обратной связи вида

$$u = -Kx, \quad (3)$$

где K — искомая матрица коэффициентов (матрица регулятора).

Задача размещения полюсов

Воспользуемся декомпозиционным методом модального синтеза [4, 5], суть которого заключается в следующем. Для динамической системы (1) рассматривается управление с обратной связью (3), которое обеспечивает требования на размещение полюсов замкнутой системы (собственных значений матриц $A - BK$) и включает в себя многоуровневую декомпозицию системы с многими входами и многими выходами (MIMO-системы) (2). При этом число уровней декомпозиции определяется отношением размерности вектора состояния к размерности вектора управления и округляется в большую сторону до целого числа.

Для рассматриваемого случая будем иметь два уровня, соответственно: нулевой и первый. Для каждого уровня должны быть определены матрицы A и B согласно (1) на основании следующих выражений:

— нулевой (исходный) уровень декомпозиции

$$A_0 = A, B_0 = B; \quad (4)$$

— первый уровень декомпозиции

$$A_1 = B_0^\perp A_0 B_0^{\perp+}, B_1 = B_0^\perp A_0 B_0, \quad (5)$$

где $B^{\perp+} = \text{null}(B^T)$ — делитель нуля, т. е. матрица, удовлетворяющая следующим условиям [4]:

$$B^\perp B = 0_{(n-r) \times r}; \quad (6)$$

$B^{\perp+}$ — псевдообратная матрица Мура—Пенроуза, т. е.

$$B^\perp B^{\perp+} B^\perp = B^\perp, B^{\perp+} B^\perp B^{\perp+} = B^{\perp+}, \\ (B^{\perp+} B^\perp)^T = B^{\perp+} B^\perp, (B^\perp B^{\perp+})^T = B^\perp B^{\perp+}.$$

Теорема [4, 5]. Если MIMO-система (4) полностью управляемая, и матрица $K \in \mathbb{R}^{r \times m}$ удовлетворяет формулам

$$K = K_0 = B_0^- A - F_0 B_0^-, B_0^- = K_1 B_0^\perp + B_0^+; \quad (7)$$

$$K_1 = B_1^+ A_1 - F_1 B_1^+, \quad (8)$$

тогда

$$\text{eig}(A - BK) = \bigcup_{i=1}^2 \text{eig}(F_{i-1}),$$

где $\text{eig}(F_0)$, $\text{eig}(F_1)$ — собственные значения каждого уровня декомпозиции, определяемые соответствующими матрицами.

Заметим, что приведенное множество законов управления задается произволом в выборе матриц $B^\perp$ — делителей нуля и матриц, формирующих собственные значения у замкнутой системы F_{i-1} , $i = 1, 2$.

лагает определение и вычисление следующих матриц:

$$\begin{aligned} A_0 = A &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ B_0 = B &= \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} \\ 0 & b_{32} & b_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ B_0^\perp &= (0 \ 0 \ 0 \ 1), \end{aligned} \quad (9)$$

$$B_0^+ = \begin{pmatrix} b_{11}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (b_{22}(b_{23}^2 + b_{33}^2) - b_{23}(b_{22}b_{23} + b_{32}b_{33}))/d_1 & (b_{32}(b_{23}^2 + b_{33}^2) - b_{33}(b_{22}b_{23} + b_{32}b_{33}))/d_1 & 0 \\ 0 & (b_{23}(b_{22}^2 + b_{32}^2) - b_{22}(b_{22}b_{23} + b_{32}b_{33}))/d_1 & (b_{33}(b_{22}^2 + b_{32}^2) - b_{32}(b_{22}b_{23} + b_{32}b_{33}))/d_1 & 0 \end{pmatrix},$$

Из приведенной теоремы следует, что закон управления (3) с матрицей $K \in \mathbb{R}^{r \times n}$, удовлетворяющей соотношениям (7), (8), обеспечивает выполнение требования заданного размещения полюсов и, соответственно, является результатом задачи синтеза управления.

Вместе с тем, особенностью линеаризованной модели самолета (2) является наличие параметрической возмущенности коэффициентов линеаризации. Проведенные в работе [6] исследования показали, что коэффициент, характеризующий приращение подъемной силы в зависимости от приращения угла атаки и угла наклона траектории, имеет наиболее ограниченный диапазон точности его определения, при котором не нарушается устойчивость замкнутой обратной связью динамической системы (стабилизируемого движения). Таким образом, ставится задача аналитического синтеза матрицы коэффициентов обратной связи в законе управления (3), которая обеспечивает робастность стабилизации продольного движения ЛА по отношению к коэффициенту $a_{22} = -a_y^\theta + a_y^\alpha$.

Аналитический синтез законов управления

Применение подхода, основанного на использовании соотношений (4) — (8), предпо-

$$\begin{aligned} A_1 = B_0^\perp A_0 B_0^{\perp+} &= 0, \quad B_1 = B_0^\perp A_0 B_0 = (0 \ b_{32} \ b_{33}), \\ B_1^+ &= (0 \ b_{32}/(b_{32}^2 + b_{33}^2) \ b_{33}/(b_{32}^2 + b_{33}^2))^T. \end{aligned}$$

Назначением по результатам предварительного анализа матриц из (7), (8), например, в следующем общем виде:

$$F = F_0 = \begin{pmatrix} f_{01} & 0 & 0 \\ 0 & f_{02} & f_{03} \\ 0 & -f_{03} & f_{02} \end{pmatrix}, \quad F_1 = f_{11} \quad (10)$$

определяется цель задачи синтеза.

Согласно формуле (7) требуемая матрица коэффициентов в законе управления, с учетом того, что

$$K_1 = F_1 B_1^+ - B_1^+ A_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -b_{32}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2) \end{pmatrix},$$

определится выражением

$$\begin{aligned} K &= F_0(B_0^+ + K_1 B_0^\perp) - (B_0^+ + K_1 B_0^\perp) A_0 = \\ &= \begin{pmatrix} (a_{11} - f_{01})/b_{11} & a_{12}/b_{11} & 0 & a_{14}/b_{11} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned}
k_{21} &= (a_{21}b_{33} - a_{31}b_{23})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{22} &= (a_{22}b_{33} - a_{32}b_{23} + b_{32}f_{03} - \\
&\quad - b_{33}f_{02})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{23} &= b_{23}f_{02}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{22}f_{03}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - a_{33}b_{23}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{32}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2), \\
k_{24} &= a_{24}b_{33}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - a_{34}b_{23}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) + \\
&\quad + b_{32}f_{02}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2) + \\
&\quad + b_{33}f_{03}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2), \\
k_{31} &= -(a_{21}b_{32} - a_{31}b_{22})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{32} &= (a_{32}b_{22} - a_{22}b_{32} + b_{32}f_{02} + \\
&\quad + b_{33}f_{03})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{33} &= a_{33}b_{22}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{22}f_{02}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{23}f_{03}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{33}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2), \\
k_{34} &= a_{34}b_{22}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - a_{24}b_{32}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{32}f_{03}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2) + \\
&\quad + b_{33}f_{02}/(b_{32}^2 + b_{33}^2).
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
k_{31} &= -(a_{21}b_{32} - a_{31}b_{22})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{32} &= (a_{32}b_{22} - a_{22}b_{32} + b_{32}f_{02} + \\
&\quad + b_{33}f_{03})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{33} &= a_{33}b_{22}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{22}f_{02}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{23}f_{03}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{33}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2), \\
k_{34} &= a_{34}b_{22}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - a_{24}b_{32}/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - b_{32}f_{03}f_{11}/(b_{32}^2 + b_{33}^2) + \\
&\quad + b_{33}f_{02}/(b_{32}^2 + b_{33}^2).
\end{aligned} \tag{13}$$

Осуществим параметризацию решения (11)–(13) с использованием преобразования подобия [4] для матрицы собственных значений нулевого уровня декомпозиции F_0 . В результате вместо формулы (11) будем иметь

$$K_m = TF_0T^{-1}(B_0^+ + K_1B_0^\perp) - (B_0^+ + K_1B_0^\perp)A_0, \tag{14}$$

где T — невырожденная квадратная матрица заданных размеров. По результатам предварительных вычислений назовем T в следующем виде:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & t & 1 \end{pmatrix}. \tag{15}$$

Здесь t — параметр, который может принимать любые значения из множества действительных чисел. Тогда выражение (14) примет вид

$$K_m = \begin{pmatrix} (a_{11} - f_{01})/b_{11} & a_{12}/b_{11} & 0 & a_{14}/b_{11} \\ k_{21} & k_{22}^m & k_{23}^m & k_{24}^m \\ k_{31} & k_{32}^m & k_{33}^m & k_{34}^m \end{pmatrix}, \tag{16}$$

где

$$\begin{aligned}
k_{22}^m &= (a_{22}b_{33} - a_{32}b_{23} + b_{32}f_{03} - \\
&\quad - b_{33}f_{02} + b_{33}f_{03}t)/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{23}^m &= (b_{23}(f_{02} - f_{03}t))/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - (b_{22}f_{03})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - (b_{32}f_{11})/(b_{32}^2 + b_{33}^2) - \\
&\quad - (a_{33}b_{23})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{24}^m &= (a_{24}b_{33})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - (a_{34}b_{23})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) + \\
&\quad + (b_{32}f_{11}(f_{02} - f_{03}t))/(b_{32}^2 + b_{33}^2) + \\
&\quad + (b_{33}f_{03}f_{11})/(b_{32}^2 + b_{33}^2), \\
k_{32}^m &= (b_{33}f_{03}t^2 + b_{32}f_{03}t - a_{22}b_{32} + \\
&\quad + a_{32}b_{22} + b_{32}f_{02} + b_{33}f_{03})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{33}^m &= (a_{33}b_{22})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - (b_{33}f_{11})/(b_{32}^2 + b_{33}^2) - \\
&\quad - (b_{22}(f_{02} + f_{03}t))/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - (b_{23}f_{03}(t^2 + 1))/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}), \\
k_{34}^m &= (a_{34}b_{22})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) - \\
&\quad - (a_{24}b_{32})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) + \\
&\quad + (b_{33}f_{11}(f_{02} + f_{03}t))/(b_{32}^2 + b_{33}^2) - \\
&\quad - (b_{32}f_{03}f_{11}(t^2 + 1))/(b_{32}^2 + b_{33}^2).
\end{aligned} \tag{17}$$

Анализ выражений (17) показывает, что коэффициент a_{22} входит в параметры закона управления k_{22}^m, k_{32}^m . Следовательно, чтобы исключить прямое присутствие указанного коэффициента модели в матрице коэффициентов усиления обратной связи, поступим следующим образом: назовем в матрице подобия (15) $t = -2b_{32}/b_{33}$, а мнимую часть комплексно сопряженной пары $f_{02} \pm if_{03}$ определим равной $f_{03} = a_{22}b_{33}/2b_{32}$. В результате получим матрицу коэффициентов обратной связи следующего вида:

$$K_p = \begin{pmatrix} (a_{11} - f_{01})/b_{11} & a_{12}/b_{11} & 0 & a_{14}/b_{11} \\ k_{21} & (b_{32}f_{03} - a_{32}b_{23} - b_{33}f_{02})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) & k_{23}^m & k_{24}^m \\ k_{31} & (a_{32}b_{22} + b_{32}f_{02} + b_{33}f_{03})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) & k_{33}^m & k_{34}^m \end{pmatrix}. \tag{18}$$

Нетрудно проверить, что данная матрица является робастной (даже, скорее, инвариантной) по отношению к коэффициенту a_{22} .

В соответствии с формулами (3), (11)–(13), (16)–(18) получим

$$u = \begin{pmatrix} (a_{11} - f_{01})/b_{11} & a_{12}/b_{11} & 0 & a_{14}/b_{11} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \\ \Delta \omega_z \\ \Delta v \end{pmatrix} \quad (19)$$

для не робастного (обычного) закона управления и

$$u_p = \begin{pmatrix} (a_{11} - f_{01})/b_{11} & a_{12}/b_{11} & 0 & a_{14}/b_{11} \\ k_{21} & (b_{32}f_{03} - a_{32}b_{23} - b_{33}f_{02})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) & k_{23}^m & k_{24}^m \\ k_{31} & (a_{32}b_{22} + b_{32}f_{02} + b_{33}f_{03})/(b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}) & k_{33}^m & k_{34}^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \\ \Delta \omega_z \\ \Delta v \end{pmatrix} \quad (20)$$

для робастного закона управления.

Как видно, законы (19) и (20) представляют собой аналитические выражения, которые могут быть использованы для вычисления конкретных сигналов управления. Эти выражения имеют относительно компактный вид и могут быть легко реализованы в реальном масштабе времени.

Численное моделирование

Для проверки полученных результатов воспользуемся числовыми значениями матриц коэффициентов следующего вида:

$$A = \begin{pmatrix} -0,0160 & -0,46 & 0 & -9,8 \\ -0,0012 & -0,26 & 0 & 0,0620 \\ -0,0130 & -2,70 & -1,04 & -0,006 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} -0,0004456 & 0 & 0 \\ 0 & -0,02335 & -0,0107 \\ 0 & -1,33 & -0,312 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Согласно выражению (10) с учетом того, что ранее было определено $f_{03} = a_{22}b_{33}/2b_{32}$, на-

значим полюса по уровням декомпозиции следующим образом:

$$F = F_0 = \begin{pmatrix} -0,537 & 0 & 0 \\ 0 & -0,65 & -0,1090 \\ 0 & 0,1090 & -0,65 \end{pmatrix},$$

$$F_1 = -2,75.$$

Предположим, что истинное значение коэффициента a_{22} отличается от модельного значения (для которого мы определили управление (19)). Обозначим это значение как a_{22}^* . В этом случае в соответствии с выражением (10) с учетом того,

что $f_{03} = a_{22}^*b_{33}/2b_{32}$, назовем полюса по уровням декомпозиции согласно выражениям

$$F = F_0 = \begin{pmatrix} -0,537 & 0 & 0 \\ 0 & -0,65 & -f_{03} \\ 0 & f_{03} & -0,65 \end{pmatrix},$$

$$F_1 = -2,75.$$

По результатам моделирования было установлено, что при значениях a_{22}^* , равных $-0,93$, и, соответственно, $f_{03} = -0,10908$ замкнутая система с обычным законом управления становится неустойчивой, поскольку ее полюса совпадают со следующим множеством:

$$\text{eig}(A - BK) =$$

$$= \{-2,56355; -0,81789; 0,00144; -0,537\},$$

тогда как для робастного закона управления имеем

$$\text{eig}(A - BK_p) =$$

$$= \{-2,5859; -0,3970 \pm 0,7098i; -0,537\}.$$

Соответственно для робастного управления матрица коэффициентов обратной связи выглядит следующим образом:

$$K_p = 10^4 \begin{pmatrix} -0,1169 & 0,1032 & 0 & 22,1992 \\ -0,000003368 & 0,001145588 & -0,00024247 & -0,00003645 \\ 0,00001852667 & -0,01357317 & 0,0007477 & 0,0004041089 \end{pmatrix}.$$

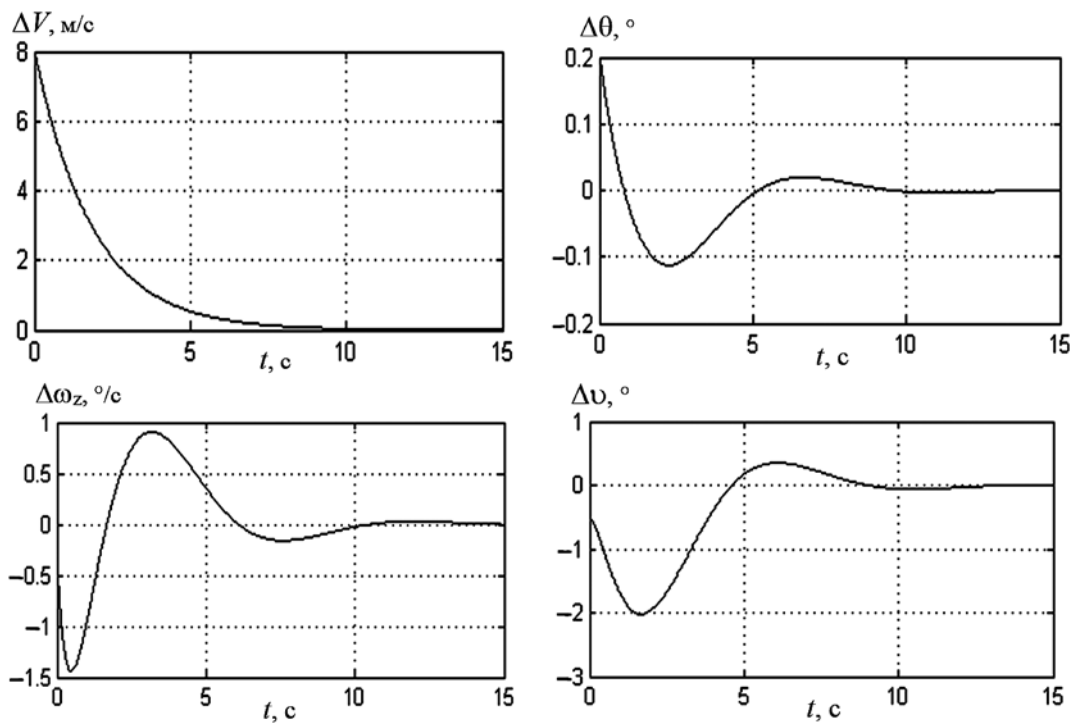


Рис. 1
Fig. 1

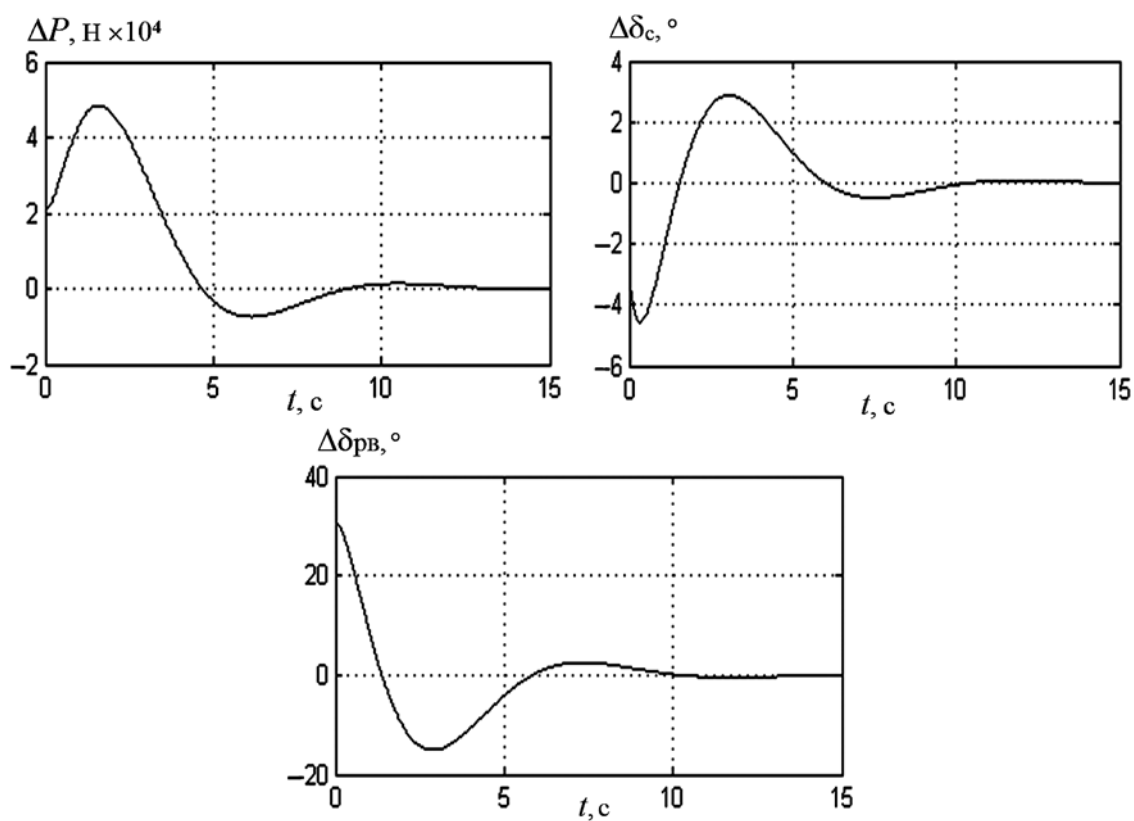


Рис. 2
Fig. 2

При этом матрица собственной динамики в замкнутом контуре "летательный аппарат — система управления" принимает вид

$$A - BK_p = \begin{pmatrix} -0,537 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1,44795 & 0,023556 & 0,09682 \\ 0 & -29,18197 & -1,932 & 0,770 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Если при моделировании значения a_{22}^* изменять в другую сторону, то, соответственно, нарушение границы устойчивости не наступает.

Для начальных значений вектора состояния

$$(\Delta V \ \Delta \theta \ \Delta \omega_z \ \Delta v)^T = (\Delta V \ \Delta \theta \ \Delta \omega_z \ \Delta v)^T = (8,00 \ 0,2 \ -0,42 \ -0,52)^T$$

при истинном значении коэффициента a_{22} , при котором не робастный закон управления приводит к потере устойчивости продольного движения, на рис. 1 представлены графики переходных процессов по компонентам вектора состояния, соответствующие робастному закону. На диаграммах рис. 2 приведены значения управляющий воздействий.

Заключение

Рассмотрен подход к решению задачи робастного синтеза на основе оригинального метода модального синтеза с многоуровневой декомпозицией модели объекта управления, позволяющий в аналитическом виде получать множество законов управления, обеспечивающих одно и то же заданное размещение собственных значений. Поиск робастного закона управления основан на параметризации этого множества с помощью невырожденного преобразования подобия. Приведенные результаты численного моделирования управления продольным движением летательного аппарата с использованием синтезированных законов подтвердили, что робастный закон управления не имеет ограничений по отношению к ошибке задания коэффициента модели, характеризующего приращение подъемной силы летательного аппарата от приращения угла атаки и угла наклона траектории. Эти результаты, наряду с ранее опубликованными [7–18], подтверждают весьма значительные возможности рассматриваемого метода модального синтеза.

Список литературы

1. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Робастное управление с "глубокой" обратной связью // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. М.: ИПУ РАН, 2019. С. 771–775.
2. Гаджиев М. Г., Мисриханов М. Ш., Рябченко В. Н., Шаров Ю. В. Матричные методы анализа и управления переходными процессами в электроэнергетических системах. М.: Изд. Дом МЭИ, 2019. 462 с.
3. Красовский А. А., Вавилов Ю. А., Сучков А. И. Системы автоматического управления летательных аппаратов. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986. 480 с.
4. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Ryabchenko V. N. Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 666 с.
5. Ryabchenko V. N., Zubov N. E., Sorokin I. V., Proletarskii A. V. Complete Pole Placement Method for Linear MIMO Systems // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2018. Vol. 19, N. 1. P. 11–18.
6. Zubov N. E., Ryabchenko V. N. К анализу робастной устойчивости продольного движения маневренного летательного аппарата // Приборы и системы. 2021. № 6. С. 10–15.
7. Zubov N. E., Ryabchenko V. N., Sorokin I. V. Synthesis of Stabilization Laws of a Single-Aircscrew Helicopter's Lateral Motion for Lack of Information about its Lateral Speed: Analytical Solution // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2018. Vol. 19, N. 4. P. 273–281.
8. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Mисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Синтез развязывающих законов стабилизации орбитальной ориентации космического аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2012. № 1. С. 92–108.
9. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Mисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Модификация метода точного размещения полюсов и его применение в задачах управления движением космического аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2013. № 2. С. 118–132.
10. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Mисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Управление по выходу спектром дескрипторной динамической системы // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468, № 2. С. 134–136.
11. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Mисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Стабилизация взаимосвязанных движений летательного аппарата в каналах тангаж–рыскание при отсутствии информации об угле скольжения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2015. № 1. С. 95–105.
12. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Mисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Управление по выходу продольным движением летательного аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2015. № 5. С. 164–175.
13. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Ryabchenko V. N., Фомичев А. В. Синтез законов управления боковым движением летательного аппарата при отсутствии информации об угле скольжения. Аналитическое решение // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 61–70.
14. Zubov N. E., Zybin E. Yu., Mikhlin E. A. и др. Управление по выходу спектром движения космического аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 111–122.
15. Zubov N. E., Lapin A. V., Mikhlin E. A., Ryabchenko V. N. Управление по выходу спектром линейной динамической системы на основе подхода Ван-дер-Воида // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476, № 3. С. 260–263.
16. Zubov N. E., Mikhlin E. A., Mисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Управление конечными собственными значениями дескрипторной системы // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 381–384.

17. **Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Рябченко В. Н., Пролетарский А. В.** Аналитический синтез законов управления боковым движением летательного аппарата // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 14–20.

18. **Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Рябченко В. Н., Тимков С. Н.** Применение адаптивного полосового фильтра в качестве наблюдателя в контуре управления международной космической станции // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 4. С. 88–100.

On One Approach to the Synthesis of Robust Control of the Stabilization of the Hypothetical Aircraft Longitudinal Motion

N. E. Zubov, nezubov@bmstu.ru, **V. N. Ryabchenko**, ryabchenko.vn@yandex.ru,
A. V. Proletarsky, pav@bmstu.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Zubov Nikolay E.**, Professor of Department of Automatic Control Systems
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: nezubov@bmstu.ru.

Accepted on December 15, 2021

Abstract

For a linearized model of the fourth order of longitudinal motion of an airplane-type aircraft with three controls, analytical expressions of control laws are obtained that ensure robustness according to one of the coefficients of the model of the control object having the smallest range of values. As such a coefficient, the increment of the lifting force from the increment of the angle of attack and the angle of inclination of the trajectory is considered. The work is based on the original decomposition of the control object model and the modal synthesis method developed on its basis. The search for robust control is based on the parametrization of a set of solutions and the assignment of eigenvalues of a closed system. The idea of this approach is as follows. If, for a given control object, we find in an analytical form the entire set of feedback control laws that provide a given set of eigenvalues, then with the appropriate parametrization of this set, we can distinguish a subset of robust control laws with respect to a particular factor. The basis for obtaining a parameterized solution to the synthesis problem is the similarity transformation for the matrix of eigenvalues of the zero level of the decomposition of the control object. The results of numerical simulation of the control of the longitudinal motion of the aircraft using synthesized analytical laws are presented. Based on its results, the influence of the coefficient of the model is estimated, at which, for a non-robust analytical control law, the aircraft loses stability in longitudinal motion. It is noted that the robust control law has no restrictions with respect to the error of setting the considered coefficient of the model, which characterizes the increment of the lifting force of the aircraft from the increment of the angle of attack and the angle of inclination of the trajectory.

Keywords: longitudinal motion, hypothetical aircraft of aircraft type, mathematical model, decompositional method of modal synthesis, system with many inputs and many outputs (MIMO-system), robust control terminal

For citation:

Zubov N. E., Ryabchenko V. N., Proletarsky A. V. On One Approach to the Synthesis of Robust Control of the Stabilization of the Hypothetical Aircraft Longitudinal Motion, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 216–224.

DOI: 10.17587/mau.23.216-224

References

1. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Robust control with "deep" feedback, *XIII All-Russian meeting on management problems of VSPU-2019. Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on the problems of VSPU management-2019*, V. A. Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences, 2019, pp. 771–775 (in Russian).
2. **Gadzhiev M. G., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N., Sharov Yu. V.** Matrix methods of analysis and control of transients in electric power systems, Moscow, Publishing House of MEI, 2019, 462 p. (in Russian).
3. **Krasovsky A. A., Vavilov Yu. A., Suchkov A. I.** Automatic control systems of aircraft, Moscow, Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky, 1986, 480 p. (in Russian).
4. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N.** Matrix methods to the theory and practice of automatic control systems of aircraft, Moscow, MGTU named after N. U. Bauman, 2016, 666 p. (in Russian).
5. **Ryabchenko V. N., Zubov N. E., Sorokin I. V., Proletarskii A. V.** Complete Pole Placement Method for Linear MIMO

- Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 11–18
6. **Zubov N. E., Ryabchenko V. N.** To Analysis of Robust Stability of Longitudinal Motion of a Maneuverable Aircraft, Instruments and Systems: Monitoring, Control, Diagnostics, 2021. № 6, pp. 10–15.
7. **Zubov N. E., Ryabchenko V. N., Sorokin I. V.** Synthesis of Stabilization Laws of a Single-Airscrew Helicopter's Lateral Motion for Lack of Information about its Lateral Speed: Analytical Solution, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 273–281.
8. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N.** Synthesis of Decoupling Laws for Attitude Stabilization of a Spacecraft, *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2012, vol. 51, iss. 1, pp. 80–96.
9. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N.** Modification of the Exact Pole Placement Method and its Application for the Control of Spacecraft Motion, *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2013, vol. 52, iss. 2, pp. 279–292.
10. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N.** Output Control of the Spectrum of a Descriptor

Dynamical System, *Doklady Mathematics*, 2016, vol. 93, iss. 3, pp. 259–261.

11. Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N. Stabilization of Coupled Motions of an Aircraft in the Pitch-Yaw Channels in the Absence of Information about the Sliding Angle: Analytical Synthesis, *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2015, vol. 54, iss. 1, pp. 93–103.

12. Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N. Output control of the Longitudinal Motion of a Flying Vehicle, *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2015, vol. 54, iss. 5, pp. 825–837.

13. Zubov N. E., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N., Fomichev A. V. Synthesis of Control Laws for Aircraft Lateral Motion at the Lack of Data on the Slip Angle: Analytical Solution, *Russian Aeronautics*, 2017, vol. 60, iss. 1, pp. 64–73.

14. Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Proletarskii A. V., Ryabchenko V. N. Output Control of a Spacecraft

Motion Spectrum, *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2014, vol. 53, iss. 4, pp. 576–586.

15. Zubov N. E., Lapin A. V., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N. Output Control of the Spectrum of a Linear Dynamic System in Terms of the Van der Woude Method, *Doklady Mathematics*, 2017, vol. 96, iss. 2, pp. 457–460.

16. Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N. Finite Eigenvalue Assignment for a Descriptor System, *Doklady Mathematics*, 2015, vol. 91, no. 1, pp. 64–67.

17. Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N., Proletarskii A. V. Analytical Synthesis of Control Laws for Lateral Motion of Aircraft, *Russian Aeronautics*, 2015, vol. 58, iss. 3, pp. 263–270.

18. Zubov N. E., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N., Timakov S. N. The use of an Adaptive Bandpass Filter as an Observer in the Control Loop of the International Space Station, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 4, pp. 560–572.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: **+7(499) 270 16 52**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 25.01.2022. Подписано в печать 15.03.2022. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН422. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru