

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 23

2022

№ 11

Издается 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

Gordin M. V., Ivanova G. S., Proletarsky A. V., Fetisov M. V. Adaptive Modelling System as a Unified Platform for Industry-Specific CAD Systems563

Имангазиева А. В. Управление сетью цепочной структуры с запаздыванием методом вспомогательного контура570

Бабочкин М. А., Баларев Д. А., Колосов О. С. Структура и анализ свойств базовых гребенчатых фильтров для автоматических систем577

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Костюков В. А., Медведев М. Ю., Пшихопов В. Х. Алгоритмы планирования сглаженных индивидуальных траекторий движения наземных роботов585

Машошин А. И. Технологии искусственного интеллекта в задачах управления автономным необитаемым подводным аппаратом596

Ахмад А., Вассуф Я., Коновалов К. В., Ющенко А. С. Исследование подводного робота с волнообразным движителем607

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://mech.novtex.ru>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 23

2022

No. 11

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.

SERGEEV 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 prospective 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

- Gordin M. V., Ivanova G. S., Proletarsky A. V., Fetisov M. V.** Adaptive Modelling System as a Unified Platform for Industry-Specific CAD Systems 563
- Imangazieva A. V.** Chain Network Control with Delay by an Auxiliary Loop Method 570
- Babockin M. A., Balarev D. A., Kolosov O. S.** Structure and Analysis of Properties of Basic Comb Filters for Automatic Systems 577

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Kostjukov V. A., Medvedev M. Y., Pshikhopov V. Kh.** Algorithms for Planning Smoothed Individual Trajectories of Ground Robots 585
- Mashoshin A. I.** Artificial Intelligence Technologies in the Autonomous Underwater Vehicle Control Systems 596
- Ahmad A., Wassouf Y., Kononov K. V., Yuschenko A. S.** Study of an Underwater Robot with an Undulating Propulsion Fin 607

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

M. V. Gordin, gordinmv@bmstu.ru, **G. S. Ivanova**, gsivanova@bmstu.ru,
A. V. Proletarsky, pav@bmstu.ru, **M. V. Fetisov**, fetisov.michael@bmstu.ru,
Science and Educational Center "Robotics" Bauman Moscow
State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Fetisov Mikhail V., Senior Lecturer, Department of Computer Systems and Networks,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: fetisov.michael@bmstu.ru

Accepted on August 5, 2022

Adaptive Modelling System as a Unified Platform for Industry-Specific CAD Systems

Abstract

The risks associated with the isolated design of complex software systems within individual industries are analyzed, where not only the same thing is often done, but also the quality of the design suffers due to incomplete competence of the implementers. The approach of dividing competence and responsibility in complex software development by introducing an additional domain-specific layer of interaction between the software developer and the subject area specialists is discussed. The use of an adaptive modelling system as a tool for such separation is proposed. It is shown that the use of adaptive modelling as a common development platform for industry-specific CAD will not only improve the quality of production design in different industries, but will also simplify the design of production in related fields. Finally, it is shown that the use of a common platform will avoid the costs associated with the trend towards simplification and atomization of software developed in our country in the face of sanctions and the degradation of global connections.

Keywords: production process modelling, production process design, modelling simulation, subject area, modelling system, adaptive modelling system, domain-specific language, problem-oriented language

For citation: **Gordin M. V., Ivanova G. S., Proletarsky A. V., Fetisov M. V.** Adaptive Modelling System as a Unified Platform for Industry-Specific CAD Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 563–569.

DOI: 10.17587/mau.23.563-569

УДК 004.434 + 004.942:658.5

DOI: 10.17587/mau.23.563-569

М. В. Гордин, канд. техн. наук, и. о. ректора, gordinmv@bmstu.ru,
Г. С. Иванова, д-р техн. наук, проф., gsivanova@bmstu.ru,
А. В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф., декан факультета "Информатика и системы управления", pav@bmstu.ru,
М. В. Фетисов, ст. преподаватель, fetisov.michael@bmstu.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Адаптивная система моделирования как единая платформа отраслевых САПР

Анализируются риски, связанные с изолированным проектированием сложных программных систем внутри отдельных отраслей промышленности, при которых нередко не только делается одно и то же, но также страдает качество разработки из-за неполной компетенции исполнителей. Рассматривается подход разделения компетенции и ответственности при разработке сложного программного обеспечения за счет введения дополнительного предметно-ориентированного слоя взаимодействия разработчика программного обеспечения со специалистами предметной области. Предлагается использование адаптивной системы моделирования в качестве средства такого разделения. Показывается, что использование адаптивной системы моделирования в качестве общей платформы разработки отраслевых САПР не только повысит качество проектирования производств в различных отраслях, но также упростит проектирование производств в смежных областях. Наконец, показывается, что использование общей платформы позволит избежать издержек, связанных с тенденцией упрощения и атомизации программного обеспечения, разрабатываемого в нашей стране, в условиях санкций и деградации глобальных связей.

Ключевые слова: моделирование производственных процессов, проектирование производственных процессов, имитационное моделирование, предметная область, система моделирования, адаптивная система моделирования, предметно-ориентированный язык, проблемно-ориентированный язык

Introduction

At the moment, humanity is witnessing a globalisation that only recently reached its highest level in human history begin to weaken and roll back [1]. The economic relations between regions and countries that have been formed over centuries are being destroyed, sanctions are being imposed and logistical links are being disrupted. And while the COVID-19 pandemic was previously blamed, now that its influence is waning and the crisis is only worsening, there is reason to believe that the cause of degradation lies deeper and that the process of global decay may be quite profound [2].

The more complex the production, subject area or industry to be automated, the more resources are required to develop and maintain the automation system. In order not to lose control of the process, hierarchical automation clusters are formed in which competences and responsibilities are shared between the performers. The correct division of labour ensures an optimum production and support structure. Organisations that have been able to create such an optimal structure appear to be the most efficient, have less overhead to maintain internal processes and, as a result, make more profit. And so they are the ones who survive. Adam Smith made this point as early as the 18th century [3]. The collapse of the global order disrupts these structures, which means that the ability to develop and maintain complex productions, including complex modelling systems, will be greatly hampered.

Quite often, when there is an urgent need for import substitution of a product, especially in a time pressure situation, an interested party will simply copy the product. This is the best case outcome. Most often, a functionally limited version is created, and it takes a long time to reach a suitable level of quality. As a result, different industries, corporations, even businesses within industries and corporations, create their own versions of the product, with little or no compatibility between each other.

Unfortunately, this is the trend in the development of industry-specific CAD in our country at present. There are many reasons for this. Let us consider, in our opinion, the main ones.

Firstly, there is no overall management of the development process of these systems, which could coordinate the development of programs by dividing responsibilities into areas of competence. For example, the practice in the Soviet Union was to designate a research institute as the main developer of software for a particular area, and to coordinate the finalization and application of the developed programs.

Secondly, more often than not, companies interested in import substitution of their CAD systems either develop them themselves, having high competence in their subject area but low in software development, or (much less frequently) outsource development to professionals who have competence in software development but no competence in the subject area. The latter option requires well-organized client-executor interaction in the development process, which is not always possible. The result is either a functionally complete product with poor code quality, which is usually brought to an acceptable state, but further development becomes difficult, or a product of more or less quality in terms of the software component, but which does not fully solve the customer's tasks and also requires revision.

This paper proposes an approach to the allocation of responsibilities according to the competencies of the participants, not only to enable the development of software of high quality in all respects, but also to enable the development of a product that has the potential to outperform its substitute analogues by a wide margin.

Separation of competence and responsibility

Fig. 1 shows the schemes for abstract development with incomplete competencies described above.

This diagram is based on a UML (Unified Modeling Language) notation variant diagram [4]. The system boundary has been removed, and instead the competence boundaries of the participants are shown as rectangles with rounded corners. The competence boundaries circumscribe both the participant and the action (function) within that competence and for the performance of which the participant is responsible.

Fig. 1 shows that both options are incomplete in terms of the competence of the participant in relation to the function they perform — these functions are outside their competence. To solve the problem of incomplete competence there is a simple trick: allocating an additional function for which both participants have competences.

Fig. 2 shows the competence diagram, which introduces the function of forming domain-specific tools — software components that, on the one hand, simplify the work of a specialist in developing a model of their subject area and, on the other hand, allow this work to be done autonomously from the software developer. It is now the responsibility of each participant to carry out their own work within their area of expertise.

The action of "developing domain-specific tools" is within the area of competence and responsibility

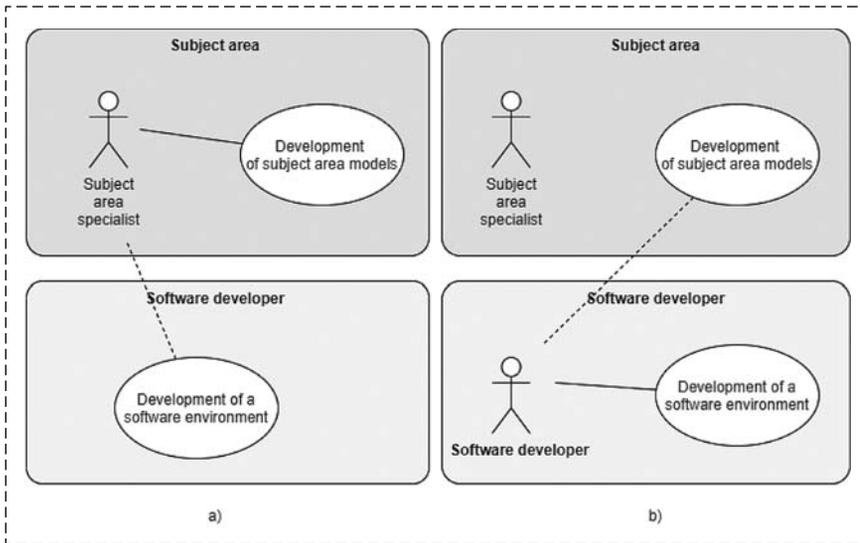


Fig. 1. Schemes with incomplete competence: incomplete competence in software development for a subject area specialist (a); incomplete competence in developing models for a subject area for a software developer (b)

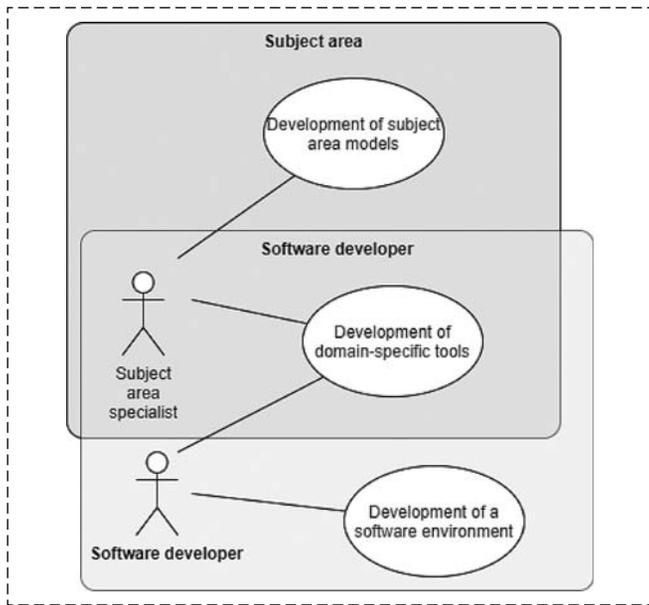


Fig. 2. Scheme of division of responsibility according to competences

of both participants in the work. This means they must somehow separate and regulate responsibilities within this function.

This technique is widely used in information technology, but it is often forgotten when planning the implementation of complex software systems. However, it is in the development of complex models that the division of competence and responsibility is most effective.

Adaptive modelling system

The Adaptive Modelling System (AMS) provides an original and unique toolkit that allows the deve-

lopment of domain-specific languages (DSL) that are more natural for experts in the respective subject areas to describe their domain models [5].

Fig. 3 (see the second side of the cover) shows the interface of the AMS when working with a model described by a system of ordinary differential equations, in the example, the Lorentz attractor is presented. It can be assumed that both DSLs for describing dynamical systems and visualization tools that allow the construction of graphs and state change diagrams of a dynamical system can be used to describe many aspects of modelling more complex systems in various subject areas.

This screenshot shows the operation with a prototype AMS developed at the Faculty of the CS6 at the Bauman Moscow State Technical University [6].

Separately, it is important to note that an AMS should have an open software architecture in order to minimize the risks associated with the development and maintenance of DSLs and visualization tools [7]. Fig. 4 shows a diagram of the system components to allow for extensibility of the AMS architecture.

Let us take a closer look at some of the components.

Unified means of working with DSL. This component is the service in which the AMS business logic is implemented. This service provides several APIs (Application Programming Interface):

The DSL API is a set of DSL interfaces that allow you to load extensions, grammars, perform syntactic and semantic analysis (including providing syntax highlighting information, remarks and errors), run the model for execution, debug the model, etc.

The BNF & Interpreter API is a set of interfaces provided to connect extensions and support the interpretation of the DSL.

The Module API is a set of interfaces that allows modules implemented in compiled languages (C, C++, FORTRAN, etc.) to be connected for use in the underlying AMS language and in the DSL.

Integrated development environment. This component uses the "Unified means of working with DSL" service to generate models, run them, debug them, etc., and also provides a Visualizer API that allows the connection of external graphical extensions.

External graphical extensions should allow, for example, forming the text of a model from a graphical

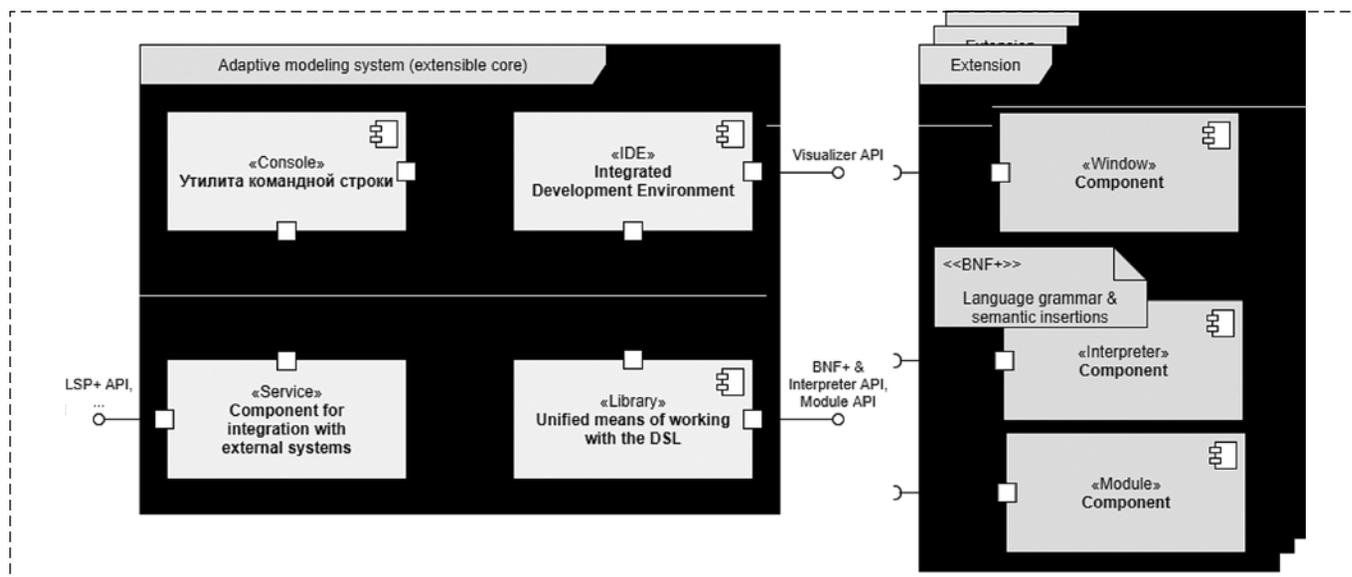


Fig. 4. Diagram of the components of the AMS open software architecture

constructor and interacting with it. For example, you can automatically generate a diagram of an algorithm or assemble an algorithm from the graphical elements of a flowchart, which can be very visual, including when debugging the application, and useful in training.

The imperative of a domain-specific language

The importance and primacy of the use of DSL in the development of the final product of a subject area is due to the several advantages that this approach offers. Among these advantages is the ability to use versatile visualization tools, as described above.

Another advantage is the ability to easily work collaboratively with version control tools and code repositories, as well as using modern tools such as continuous integration and many others associated with it.

Parallel to the development and maintenance of DSLs, visualisation tools can be developed and maintained based on the code structure written using the DSL. That is, the code is the primary description of the subject area, and schemes and diagrams are the graphical interpretation of the code. Moreover, a schema can be edited, which will be reflected in the code structure. Such a division is used in many subject areas and has shown its consistency, having stood the test of time.

Fig. 5 and Fig. 6 (see the second side of the cover) show examples of schematics when building an image processing structure using shaders in Blender [8], as well as a schematic description of an electrical circuit using the System Verilog [9]. Behind a cowl of work with the models in these systems the primary

domain-specific language of the description of these models hides. At the same time, the given schemes are iterative, allow changing parameters of elements, running and debugging of models.

As another example of a successful implementation of the separation of the linguistic and graphical components of modelling, universal modelling systems such as MATLAB, Modelica and many others, which have a basic language name in their names, but are often associated specifically with graphical tools that allow visualization of models.

It is also important to note a feature of the language implementation of a model, such as its great generality. In a domain-specific language, it is usually possible to describe a complex model that cannot be represented in graphical form. This diversifies the process of developing complex models.

Modern code editing tools allow one to perform not only lexical and syntactic analysis and highlight structure or errors directly when typing or modifying code, but also to perform semantic analysis from a domain-specific perspective, which leads to the identification of a certain class of problems at a very early stage of model formation [10].

Division of competence when working with industry-specific CAD

Let us return to competence diagrams. Fig. 7 shows a competency diagram for the use of an AMS in a specific domain.

This diagram has more participants and more functions that are specific to the implementation of

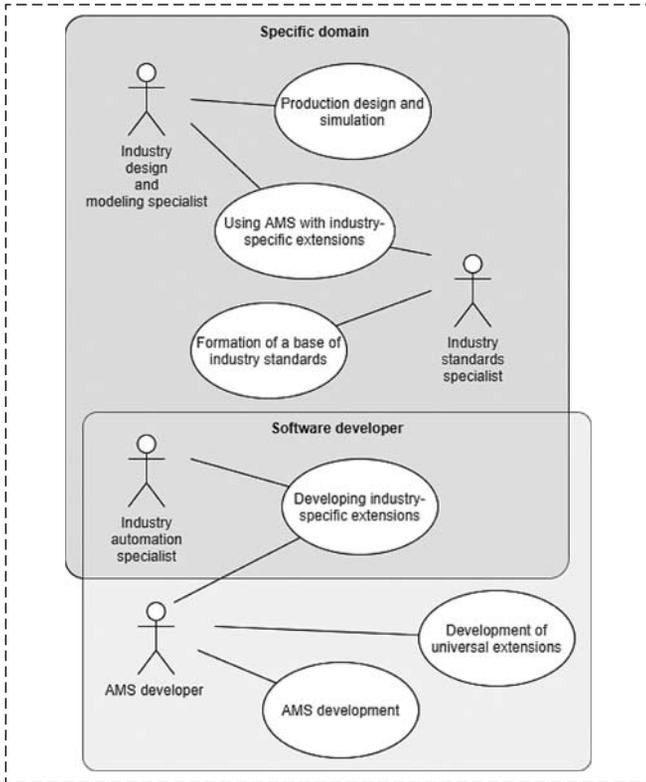


Fig. 7. Using an AMS in production design and modelling

CAD for a particular industry. Let us take a more detailed look at the diagram.

The AMS developer is responsible, within his area of expertise, for the development of the AMS, universal solutions, and shares the development of industry extensions with the industry automation specialist. Next, the industry standards specialist

is involved, using the AMS and industry-specific extensions to build the industry standards base. Finally, the industry design and simulation specialist performs production design tasks using the AMS, the industry extensions and the standards database.

The diagram shown in Fig. 7 is an example, in a particular case there may of course be different layers and sequences of interaction. In this case it is important to show how the use of the division of competence and responsibility can work in complex domain-specific, simplifying the interaction between participants and ultimately improving the quality of their work.

As shown, the AMS developer generates some universal extensions that can be used in different subject areas and industries. Fig. 8 shows a diagram of AMS components, both with universal extensions and with extensions for domain-specific.

Responsibility management in multi-domain-specific cooperation

Using an AMS as a common platform for the development of industry-specific CAD and simulation systems has a very important advantage: the compatibility of extensions for different subject areas. This makes it possible to build models using extensions from related industries.

Fig. 9 shows a diagram of the division of competences in a two-domain cooperation. Of course, there may be other options for cooperation, including more complex and multi-domain cooperation.

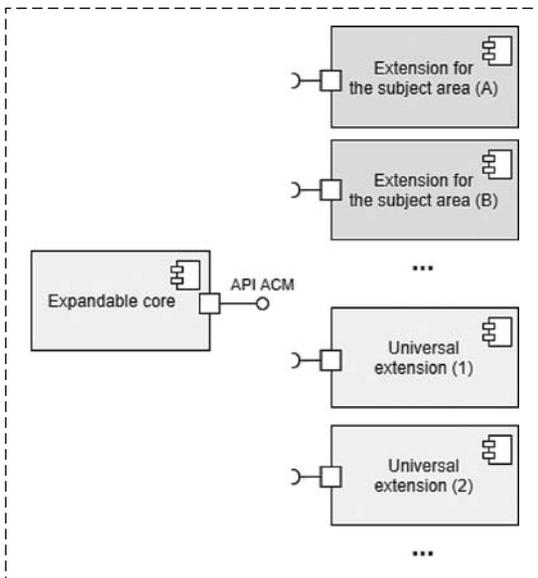


Fig. 8. Component enlargement diagram of AMS components with universal extensions and domain-specific extensions

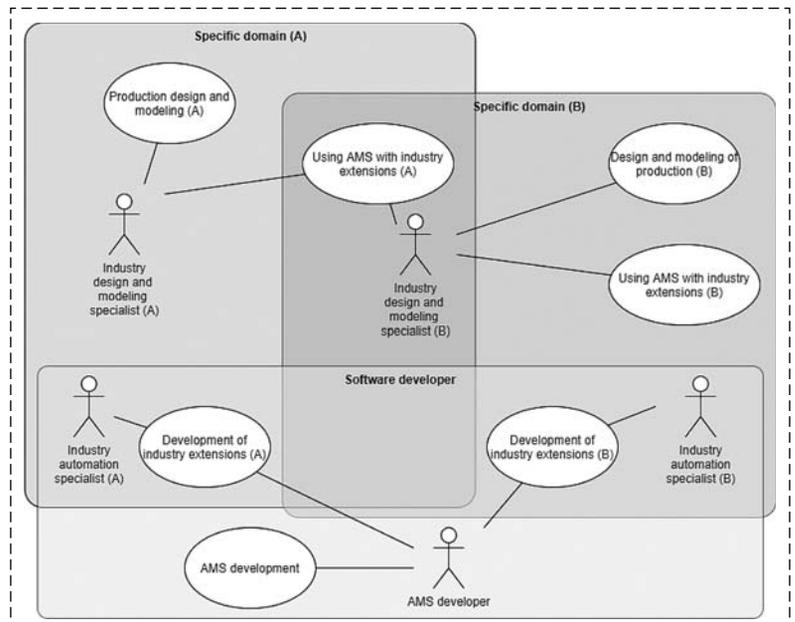


Fig. 9. Using industry extension (A) in industry design and modelling (B)

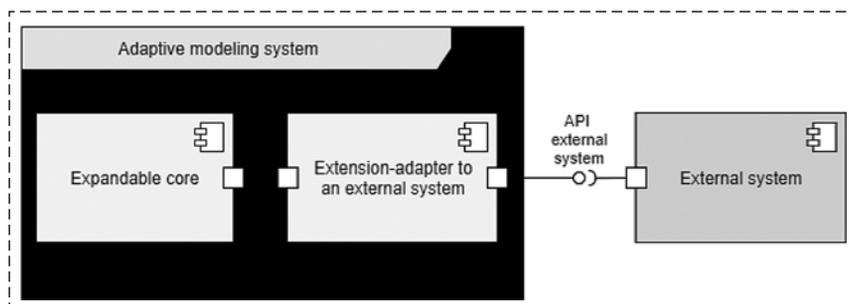


Fig. 10. Connecting an external system via an extension adapter

Possibility of connecting external systems

What if there is some modelling or design system, developed independently of the AMS, that needs to be used to extend the production model. In this case, much depends on the software architecture of the external solution.

Fig. 10 shows a component diagram with an extension-adapter, which allows an external system to be connected to the AMS via its API and to do design work together. However, the feasibility of such a solution is highly dependent on the implementation of the specific external software system.

Analogues of an adaptive modelling system

The main function of an AMS is to be able to work with many domain-specific languages built on the basis of a base language. Thus, the set of DSL in AMS is a hierarchy of dialects of the basic language that have semantic features, i.e. extending the basic operational semantics. In order to optimally implement this approach, substantial unification of lexis, syntax and semantics within AMS is used. Such unification largely contradicts the classical notion of compiler construction. For example, the implementation of the built-in generator of compilers on the basis of the common parsing automaton for automatically generated grammar tables [7] was criticized by Nicholas Wirth in his work "Building compilers" [11] and suggested using common external generators, e.g., YACC [12], Bison [13] or others. However, in the context of a compact description of a potentially large number of DSL dialects and their frequent refinement, the canonical approach seems unnecessarily cumbersome.

Basically, for this reason there are no direct counterparts to AMS. However, there are some developments in which similar ideas and trends can be seen.

For example, the Russian system **AnyLogic** [14] is software for simulating business processes in lo-

gistics, healthcare, manufacturing and banking, as well as any other processes that can be represented as a sequence of operations. The tool has a modern graphical interface and allows the use of Java language for model development.

We can also note the trend towards unification of compiler construction on the part of universal languages. Examples are **GCC** (GNU Compiler Collection) and **LLVM** (Low Level Virtual Machine). The principle of work of these program infrastructures is the following: on the frontend (the upper level of the compiler) the source program code is read, its parsing is performed and an abstract syntax tree is generated and on the backend (the lower level of the compiler) this tree is converted into some intermediate representation which is optimized and translated into an assembly language program [15]. This approach allows compilers from many programming languages to be implemented on the frontend. All these compilers form an intermediate representation and further processing is unified.

In GCC the abstract syntax tree is converted to RTL (Register Transfer Language) which is an intermediate internal representation close to an assembly language, whereas in LLVM there is an intermediate assembly language which can be transformed at compile time [16].

There are also alternative solutions for compiler and DSL implementations that offer additional features and extensions.

For example, **Xtext**, a framework for developing programming languages and DSL, allows generating not only a parser and a compiler, but also a fully customizable Integrated Development Environment (IDE). The DSL is described in Xtext with Java inserts, and the source code is created in Java [17].

Tree-sitter is a tool for creating parsers in C from a grammar description described in a language resembling RBNF (extended Backus-Naurus form). This tool allows you to build a specific syntax tree from a source file and efficiently update it when editing the source file [18]. This system is rather limited: for example, there is no possibility to put semantic inserts in the grammar description.

Domain-Specific Language Designer is a dedicated Visual Studio solution for DSL design. Microsoft offers creation and editing of DSL definition by means of graphical interface: elements and relations in the model of the subject domain are shown on the model schema. The code generator takes this definition as input and creates C# source code as output [19].

MPS (Meta Programming System) is a metaprogramming system developed by JetBrains [20]. It implements the language-oriented programming paradigm [21], is a language development environment and at the same time an IDE for languages under development.

The presented solutions are designed for designing universal programming languages without taking into account the peculiarities of a particular subject area, or for designing DSL, but with rather limited functionality. In general, the prevailing view in the information technology community is that "DSL is a programming language with limited expressive power, oriented towards a specific subject area" (Martin Fowler) [22]. In reality this may not be the case. A DSL in an adaptive modelling system is a programming language which extends the semantics of a basic generic language. More often than not, the semantics of the underlying language will be restricted in a particular DSL, but this is not mandatory. The basic AMS language, in turn, should be constructed in such a way that its semantics can be easily extended — a very interesting, but far beyond the scope of this article, topic for discussion.

Ideas related to the implementation of a modeling system that allows combining different subject areas are also emerging in the Western scientific community. Thus, a similar approach in decision-making systems is proposed, which may be useful for use in AMS as well [23], [24].

Conclusion

The use of an adaptive modelling system as a single platform for branch CAD will not only provide a high-quality software component for automating the domain-specific by dividing the competence and responsibility of the implementers, but will also make it easier and faster to design complex production at the interface between industries.

The use of AMS will also avoid the costs of designing complex productions associated with the trend towards simplification and atomization of software developed in our country, in the face of sanctions and the degradation of global connectivity.

References

1. **Glazyev S.** The last round of liberal globalization [Electronic resource], available at: <https://izborsk-club.ru/11870> (access date: 07.07.2022) (in Russian).

2. **Smirnov G.** The Undefined Ways of Globalisation [Electronic resource], available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5295109> (access date: 07.07.2022). (in Russian).
3. **Smith A.** (1776). An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations [Electronic resource], available at: <https://books.google.ru/books?id=C5dNAAAACAAJ> (accessed 07.07.2022).
4. **Unified Modeling Language** [Electronic resource], available at: <https://www.omg.org/spec/UML> (accessed 07.07.2022).
5. **Ivanova G. S., Zhiltsov A. I., Fetisov M. V., Chulin N. A., Yudin A. E.** Adaptive Modelling System, *Automation. Modern Technologies*, 2020, no. 11, pp. 500.
6. **SIMODO** in Bauman Moscow State Technical University repository [Electronic resource], available at: <https://bmstu.codes/lsx/simodo> (access date: 07.07.2022).
7. **Ivanova G. S., Fetisov M. V., Malkina T. A., Raldugina A. V.** Unification of work with subject-oriented languages and open software architecture in adaptive simulation system, *Dynamics of Complex Systems*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 36–47.
8. **Blender** [Electronic resource], available at: <https://www.blender.org> (accessed 01.06.2021).
9. **1800-2017 — IEEE Standard for SystemVerilog--Unified Hardware Design, Specification, and Verification Language** [Electronic resource], available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8299595> (accessed 07.07.2022).
10. **Ivanova G. S., Fetisov M. V.** The concept of contract management in the base language of the adaptive modeling system, *3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, IEEE, 2021, pp. 833–836.
11. **Wirth N.** Building compilers, Moscow, DMK Press, 2016 (in Russian).
12. **BYACC — Berkeley Yacc — Generate LALR(1) parsers** [Electronic resource], available at: <https://invisible-island.net/byacc/byacc.html> (accessed 04.11.2019).
13. **GNU Bison** [Electronic resource], available at: <https://www.gnu.org/software/bison/> (accessed 04.11.2019).
14. **AnyLogic** [Electronic resource], available at: <https://www.anylogic.ru> (accessed 01.06.2021).
15. **Griffiths A.** GCC. A handbook for users, programmers, and system administrators, Diasoft. 2004.
16. **Brown A., Wilson G.** LLVM (Chris Lattner), The Architecture of Open Source Applications, 2011.
17. **Xtext** [Electronic resource], available at: <https://www.eclipse.org/Xtext/index.html> (accessed 07.07.2022).
18. **Tree-sitter** [Electronic resource], available at: <https://tree-sitter.github.io/tree-sitter/> (accessed 07.07.2022).
19. **Domain-Specific Language Designer** [Electronic resource], available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/visualstudio/modeling/modeling-sdk-for-visual-studio-domain-specific-languages> (accessed 07.07.2022).
20. **MPS — Meta Programming System** [Electronic resource], available at: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/mps> (accessed 07.07.2022).
21. **Dmitriev S.** Language-oriented programming [Electronic resource], available at: <http://rsdn.org/article/philosophy/LOP.xml> (access date: 07.07.2022).
22. **Fowler M., Parsons R.** Domain Specific Languages, ADDISON-WESLEY, 2010.
23. **Roci M., Salehi N., Amir S.** et al. Towards circular manufacturing systems implementation: A complex adaptive systems perspective using modelling and simulation as a quantitative analysis tool, *Sustainable Production and Consumption*, 2022, vol. 31, pp. 97–112.
24. **Roci M., Salehi N., Amir S.** et al. Multi-method simulation modelling of circular manufacturing systems for enhanced decision-making, *MethodsX*, 2022, vol. 9, article 101709.

А. В. Имангазиева, канд. техн. наук, доц., aliya111@yandex.ru,
Астраханский государственный технический университет

Управление сетью цепочной структуры с запаздыванием методом вспомогательного контура*

Работа посвящена разработке алгоритмов управления сетью агентов цепочной структуры, каждый агент которой является линейным объектом с запаздыванием по состоянию, подверженным действию внешних неконтролируемых возмущений в условиях априорной неопределенности. В каждом агенте сети осуществляется слежение за выходом предшествующего агента, а сигнал с ведущей подсистемы поступает только в первый агент сети, связь односторонняя. Учет временной задержки в моделях каждого агента сети такой структуры делает их близкими к реальным. В системах управления агентами осуществляется компенсация возмущений путем реализации принципа инвариантности, а именно, в каждом агенте сети компенсация действия внешних возмущений, действующих на агент сети извне, а также внутренних возмущений, вызванных различными режимами функционирования объекта, осуществляется путем формирования специального сигнала возмущений, и затем выполняется его последующая компенсация с помощью вспомогательного контура и двух наблюдателей Халила. Приведен числовой пример сети цепочной структуры, состоящей из четырех линейных объектов управления в условиях интервальной неопределенности параметров их математических моделей, запаздывания по состоянию и действия внешних неконтролируемых возмущений. Численное моделирование проведено в MATLAB Simulink. Представлены графики переходных процессов по ошибкам слежения агентов цепочной структуры, подтверждающие теоретические выводы и иллюстрирующие хорошую работоспособность алгоритмов управления сети агентов цепочной структуры.

Ключевые слова: сеть цепочной структуры, робастное управление, априорная неопределенность, неконтролируемые возмущения, управление, запаздывание, наблюдатель, вспомогательный контур

Введение

Методам управления сетями агентов различной природы посвящено огромное число публикаций, например, работы [1–8, 15, 16]. При решении производственных, электроэнергетических и иных сетевых задач требуется достижение целей управления: синхронизация, консенсус, роение и т. д. Так, например, в работе [1] решаются задачи стабилизации формации из идентичных агентов, в статье [2] проводится анализ алгоритмов роения. В статье [3] рассматривается дискретная модель сети цепочной структуры, синхронизация сети электрогенераторов рассмотрена в работах [6, 8] и т. д. В отечественных обзорных работах [5, 6] приведены области применения сетевых объектов и задачи сетевого управления.

Управление сетями агентов сопровождается внедрением современных законов управления, позволяющих в каждом агенте сети учитывать наличие внутренних и внешних неконтролируемых возмущений. Одним из подходов к управлению сетью агентов является применение ранее полученных законов управления для управления каждым агентом сети [8, 9]. Однако вопросы компенсации возмущений для каждого агента с учетом взаимных связей в сети остаются открытыми. Обзорными работами по состоянию

теоретических методов построения наблюдателей возмущений, а также по их практическому применению являются работы [10, 11].

В статье [12] для решения задачи построения систем управления, малочувствительных к параметрическим и неконтролируемым внешним возмущениям, предложено робастное управление с применением метода вспомогательного контура. В основе этого метода, предложенного в работах [12–15], лежит принцип динамической компенсации, суть которого состоит в формировании сигнала возмущений, негативно влияющего на систему, а затем его последующей компенсации. С помощью метода вспомогательного контура предложены решения различных задач теории управления для объектов, математическими моделями которых являются дифференциальные уравнения: линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные, с отклоняющимся аргументом (запаздывание по состоянию, запаздывание по управлению), сингулярно-возмущенные и интегро-дифференциальные уравнения (распределенное запаздывание) и др. Опубликовано большое число статей, монографий, диссертаций с использованием метода вспомогательного контура, например [8, 9, 12–18].

В данной работе предлагается расширение области применения полученного ранее результата [18] к управлению сетью линейных объектов с запаздыванием по состоянию цепочной структуры. Решение поставленной задачи получено

*Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00610.

в условиях действия внешних неконтролируемых возмущений, а также интервальной неопределенности параметров математических моделей объектов. Приведен числовой пример сети цепочной структуры, состоящей из четырех линейных объектов управления в условиях интервальной неопределенности параметров их математических моделей, запаздывания по состоянию и действия внешних неконтролируемых возмущений. Для сети агентов применены полученные алгоритмы управления. Численное моделирование проведено в MATLAB Simulink. Представлены графики переходных процессов по ошибкам слежения для каждого из четырех агентов цепочной структуры, подтверждающие теоретические выводы и иллюстрирующие хорошую работоспособность алгоритмов управления.

Постановка задачи

Рассмотрим цепь r идентичных агентов сети, динамические процессы в которых описываются линейными уравнениями с отклоняющимися аргументами:

$$\begin{aligned} Q_l(D)y_l(t) &= k_l R_l(D)u_l(t) + N_l(D)y_{l-1}(t) + \\ &+ G_l(D)y_l(t - h_l(t)) + f_l(t), \quad (1) \\ D^i y_l(0) &= y_{il}, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad l = \overline{1, r}. \end{aligned}$$

где $y_l(t)$, $u_l(t)$ — скалярные регулируемые переменные и управляющие воздействия агентов сети цепочной структуры; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования; $Q_l(D)$, $R_l(D)$ — нормированные дифференциальные операторы, $\deg Q_l(D) = n$, $\deg R_l(D) = m$; $N_l(D)$, $G_l(D)$ — дифференциальные операторы, $\deg N_l(D) \leq n-1$, $\deg G_l(D) \leq n-1$; запаздывания $h_l(t)$ — ограниченные функции; $k_l > 0$, $f_l(t)$ — внешние возмущающие воздействия, $l = \overline{1, r}$.

Синхронизирующая подсистема цепи описывается уравнением

$$Q_m(D)y_m(t) = k_m g(t), \quad (2)$$

где $g(t)$ — скалярное ограниченное задающее воздействие; $k_m > 0$, $y(t)$ — ограниченный скалярный выход; $\deg Q_m(D) = n - m$.

Необходимо получить алгоритмы управления в каждом агенте сети, обеспечивающие выполнение следующего основного целевого условия:

$$|y_l(t) - y_m(t)| \leq \delta \quad \text{при } t \geq T, \quad (3)$$

где δ — требуемая динамическая точность, $T > 0$.

Будем проектировать систему так, чтобы в каждом агенте цепи выполнялись условия

$$\begin{aligned} |y_1(t) - y_m(t)| &\leq \delta_1, \\ |y_l(t) - y_{l-1}(t)| &\leq \delta_l, \quad l = \overline{2, r}. \end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что для обеспечения условия (3) сумма δ_l , $l = \overline{1, r}$, должна быть меньше требуемой точности δ .

Предположения

1. Агенты сети являются управляемыми.
2. Коэффициенты операторов $Q_l(D)$, $R_l(D)$ и величины k_l зависят от вектора неизвестных параметров $\xi \in \Xi$, где Ξ — известное множество возможных значений вектора ξ .
3. Задающее воздействие $g(t)$ и возмущающие воздействия $f_l(t)$, $l = \overline{1, r}$, агентов цепи являются ограниченными функциями времени.
4. Полиномы $R_{0l}(\lambda)$, $Q_m(\lambda)$, $R_{0l}(\lambda)$ — гурвицевы, где λ — комплексная переменная в преобразовании Лапласа; $\deg Q_l(D) = n$, $\deg R_l(D) = m$, $\deg Q_m(D) = n - m$.
5. Производные входов и выходов агентов цепи не измеряются.
6. Запаздывания $h_l(t)$ — ограниченные функции времени, удовлетворяющие условиям $dh_l/dt < 1$, $h_l(t) > 0$, $l = \overline{1, r}$.

Решение задачи

В задачах управления сетями нет единого объекта управления и единого регулятора, объекты и регуляторы рассматриваются как взаимодействующие агенты в многоагентной системе [6]. Применим для управления каждым агентом сети алгоритм управления [9], при этом будем учитывать в каждом агенте компоненты взаимодействия агентов сети цепочной структуры.

Представим операторы $Q_l(D)$ и $R_l(D)$ в виде $Q_l(D) = Q_{0l}(D) + \Delta Q_l(D)$, $R_l(D) = R_{0l}(D) + \Delta R_l(D)$, где $Q_{0l}(D)$, $R_{0l}(D)$ — операторы с известными коэффициентами, такие что полиномы $Q_{0l}(\lambda)$, $R_{0l}(\lambda)$ — гурвицевы и имеют порядки n и m соответственно. Выберем полиномы $Q_{0l}(\lambda)$ и $R_{0l}(\lambda)$ так, чтобы выполнялись равенства $Q_m(D) = Q_{0l}(D)/R_{0l}(D)$. Тогда уравнения (1) преобразуем в эквивалентные уравнения:

$$\begin{aligned} Q_m(D)y(t) &= \\ &= k_l(u_l(t) + \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)}u_l(t) - \frac{\Delta Q_l(D)}{k_l R_{0l}(D)}y_l(t) + \\ &+ \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)}y_{l-1}(t) + \frac{G_l(D)}{k_l R_{0l}(D)}y_l(t - h_l(t)) + \\ &+ \frac{1}{k_l R_{0l}(D)}f_l(t)), \quad l = \overline{1, r}. \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно методике, предложенной в работе [11], составим уравнения относительно ошибок слежения

$$e_1 = y_1 - y_m, e_2 = y_2 - y_1, \dots,$$

$$e_l = y_l - y_{l-1}, \dots, e_r = y_r - y_{r-1}$$

в цепи, вычитая (2) из (4):

$$\begin{aligned} Q_m(D)e_1(t) &= k_1 \left(u_1(t) + \frac{\Delta R_1(D)}{R_{01}(D)} u_1(t) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\Delta Q_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_1(t) + \frac{N_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_m(t) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{G_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_1(t - h_1(t)) + \frac{1}{k_1 R_{01}(D)} f_1(t) - \frac{k_m g(t)}{k_1 R_{01}(D)} \right); \\ Q_m(D)e_l(t) &= k_l (u_l(t) + \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} u_l(t) - \\ &\quad - \frac{\Delta Q_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t) + \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_{l-1}(t) + \\ &\quad + \frac{G_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)) + \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} f_l(t) - \\ &\quad - \frac{Q_m}{k_l R_{0l}(D)} y_{l-1}(t)), \quad l = \overline{2, r}. \end{aligned} \quad (5)$$

Сформируем управляющие воздействия в агентах цепи, которые позволят компенсировать негативное действие внешних и внутренних возмущений, а также эффекты от запаздывания в l -м агенте цепи. В случае доступности измерения $n - m - 1$ производных управляющего воздействия $v_l(t)$ закон управления $u_l(t)$ в l -м агенте зададим в виде

$$u_l(t) = T_l(D)v_l(t), \quad l = \overline{1, r}. \quad (6)$$

Тогда уравнения (5) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} Q_{m1}(D)e_1(t) &= k_1 T_1(D) \left(v_1(t) + \frac{\Delta R_1(D)}{R_{01}(D)} v_1(t) - \right. \\ &\quad - \frac{\Delta Q_1(D)}{k_1 R_{01}(D) T_1(D)} y_1(t) + \frac{N_1(D)}{k_1 R_{01}(D) T_1(D)} y_m(t) + \\ &\quad \left. + \frac{G_1(D)}{k_1 R_{01}(D) T_1(D)} y_1(t - h_1(t)) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{k_1 R_{01}(D) T_1(D)} f_1(t) - \frac{k_m g(t)}{k_1 R_{01}(D) T_1(D)} \right); \\ Q_{ml}(D)e_l(t) &= k_l T_l(D) (v_l(t) + \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} v_l(t) - \\ &\quad - \frac{\Delta Q_l(D)}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t) + \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} y_{l-1}(t) + \\ &\quad + \frac{G_l(D)}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t - h_l(t)) + \frac{1}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} f_l(t) - \\ &\quad - \frac{Q_m(D)}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} y_{l-1}(t)), \quad l = \overline{2, r}. \end{aligned} \quad (7)$$

Однако, согласно предположению 5, в проектируемой системе управления производные выходов и входов агентов сети не доступны измерению, поэтому зададим закон управления с использованием оценок производных переменных системы, т. е. зададим закон управления в l -м агенте вместо (6) в виде

$$u_l(t) = T_l(D)\bar{v}_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (8)$$

где $\bar{v}_l(t)$ — оценка сигнала, получаемая с фильтра [19]

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_l &= F_{0l}\zeta_l(t) + B_{0l}(v_l(t) - \bar{v}_l(t)), \\ \bar{v}_l(t) &= L_l\zeta_l(t), \quad l = \overline{1, r}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $\zeta_l(t) \in R^{n-m}$, F_{0l} — матрица в форме Фробениуса с нулевой нижней строкой; $L_l = [1, 0, \dots, 0]$, $B_{0l}^T = \begin{bmatrix} b_{1l} & & b_{(n-m)l} \\ \mu & & \mu^{n-m} \end{bmatrix}$. Элементы $b_1, \dots, b_{(n-m)l}$ выбираются таким образом, чтобы матрицы $F_l = F_{0l} + B_l L$ были гурвицевыми, $B_l^T = [b_{1l}, \dots, b_{(n-m)l}]$, $l = \overline{1, r}$.

С учетом (8) уравнения (7) примут вид

$$\begin{aligned} Q_{ml}(D)e_l(t) &= \beta_l T_l(D) R_{0l}(D) v_l(t) + \\ &+ \bar{\varphi}_l(t) + \beta_l T_l(D) R_{0l}(D) (v_l(t) - \bar{v}_l(t)), \end{aligned} \quad (10)$$

где функция $\bar{\varphi}_l(t)$, содержащая информацию о возмущениях, при $l = 1$ имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1(t) &= (k_1 - \beta_1) v_1(t) + k_1 \frac{\Delta R_1(D)}{R_{01}(D)} v_1(t) - \\ &- \frac{\Delta Q_1(D)}{R_{01}(D) T_1(D)} y_1(t) + \frac{N_1(D)}{R_{01}(D) T_1(D)} y_m(t) + \\ &+ \frac{G_1(D)}{R_{01}(D) T_1(D)} y_1(t - h_1(t)) + \\ &+ \frac{M_1(D)}{R_{01}(D) T_1(D)} f_1(t) - \frac{k_m}{R_{01}(D) T_1(D)} g(t), \end{aligned}$$

а при $l = \overline{2, r}$ — вид

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_l(t) &= (k_l - \beta_l) v_l(t) + k_l \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} v_l(t) - \\ &- \frac{\Delta Q_l(D)}{R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t) + \frac{N_l(D)}{R_{0l}(D)} y_{l-1}(t) + \\ &+ \frac{G_l(D)}{R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t - h_l(t)) + \\ &+ \frac{M_l(D)}{R_{0l}(D) T_l(D)} f_l(t) - \frac{Q_m(D)}{R_{0l}(D)} y_{l-1}(t). \end{aligned}$$

Будем выбирать в l -м агенте цепи полином $T_l(\lambda)$ так, чтобы передаточная функция удовлетворяла условию

$$\frac{T_l(\lambda)}{Q_m(\lambda)} = \frac{1}{\lambda + a_{ml}}$$

Тогда уравнение (10) примет вид

$$(D + a_{ml})e_l(t) = \beta_l v_l(t) + \varphi_l(t), \quad (11)$$

где $\varphi_l(t) = \frac{1}{T_l(D)} \bar{\varphi}_l(t) + \beta_l(\bar{v}_l(t) - v_l(t))$, $l = \overline{1, r}$.

Промежуточный сигнал $\varphi_l(t)$, $l = \overline{1, r}$, l -го агента сети цепочной структуры несет информацию о неопределенности параметров, внешних возмущениях, запаздывании в каналах агента. Воспользуемся методом вспомогательного контура [8] для компенсации негативного действия выделенного сигнала $\varphi_l(t)$ в l -м агенте сети цепочной структуры.

Пусть вспомогательный контур в l -м агенте описывается следующим уравнением:

$$(D + a_{ml})\bar{e}_l(t) = \beta_l v_l(t), \quad l = \overline{1, r}. \quad (12)$$

С учетом уравнений (11), (12) составим уравнение для сигнала рассогласования:

$$(D + a_{ml})\zeta_l(t) = \varphi_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (13)$$

где $\zeta_l(t) = y_l(t) - \bar{y}_l(t)$, $\zeta_l(t)$ — рассогласование.

Таким образом, в случае доступности измерения $n_l - m_l - 1$ производных сигнала $v_l(t)$ и первой производной регулируемой величины $e_l(t)$, сформировав $v_l(t)$ в виде

$$v_l(t) = -\frac{1}{\beta_l} (D + a_{ml})\zeta_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (14)$$

получим, что закон управления (6), (14) обеспечивает асимптотическую устойчивость системы (1), (6), (14) по переменной $e_l(t)$, а уравнение замкнутой системы будет иметь вид $(D + a_{ml})e_l(t) = 0$. Иными словами, из уравнения (5) имеем, что $n - m$ производные сигнала $e_l(t)$ стремятся к 0.

Однако для работоспособности системы управления в l -м агенте необходимо показать, что сигнал $\varphi_l(t)$ ограничен.

В случае доступности измерению перечисленных производных переменных системы

$$\varphi_l(t) = \frac{1}{T_l(D)} \bar{\varphi}_l(t),$$

а из соотношения (14) имеем, что

$$v_l(t) = -\frac{1}{\beta_l} \varphi_l(t).$$

Тогда

$$\begin{aligned} u_1(t) = & -\frac{1}{\beta_1} \left((k_1 - \beta_1)u_1(t) + k_1 \frac{\Delta R_1(D)}{R_{01}(D)} u_1(t) - \right. \\ & - \frac{\Delta Q_1(D)}{R_{01}(D)} y_1(t) + \frac{N_1(D)}{R_{01}(D)} y_m(t) + \frac{G_1(D)}{R_{01}(D)} \times \\ & \times y_1(t - h_1(t)) + \frac{1}{R_{01}(D)} f_1(t) - \frac{k_m}{R_{01}(D)} g(t) \Big); \\ u_l(t) = & -\frac{1}{\beta_l} \left((k_l - \beta_l)u_l(t) + k_l \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} u_l(t) - \right. \\ & - \frac{\Delta Q_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t) + \frac{N_l(D)}{R_{0l}(D)} y_{l-1}(t) + \\ & + \frac{G_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)) + \\ & \left. + \frac{1}{R_{0l}(D)} f_l(t) - \frac{Q_m(D)}{R_{0l}(D)} y_{l-1}(t) \right), \quad l = \overline{2, r}. \end{aligned} \quad (15)$$

Отметим, что в уравнениях (15) члены

$$\frac{\Delta Q_1(D)}{R_{01}(D)} y_1(t), \quad \frac{N_1(D)}{k_{1l} R_{01}(D)} y_m(t), \quad \frac{G_1(D)}{R_{01}(D)} y_1(t - h_1(t)),$$

$$\frac{1}{R_{01}(D)} f_1(t), \quad \frac{k_m}{R_{01}(D)} g(t), \quad \frac{\Delta Q_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t),$$

$$\frac{G_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)), \quad \frac{1}{R_{0l}(D)} f_l(t), \quad \frac{k_m}{R_{0l}(D)} g(t)$$

ограничены в силу выполнения условия $\lim_{t \rightarrow \infty} e_l(t) = 0$, а также условий предположений 3, 4, 6. Важно подчеркнуть, что компонента взаимодействия в l -м агенте $\frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_{l-1}(t)$ также является ограниченной в силу гурвицевости полинома $R_{0l}(D)$ и условия $\lim_{t \rightarrow \infty} e_l(t) = 0$.

Из уравнений (15) имеем:

$$\begin{aligned} u_1(t) = & \left(-\frac{\Delta R_1(D)}{R_{01}(D)} u_1(t) + \frac{\Delta Q_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_1(t) - \right. \\ & - \frac{N_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_m(t) - \frac{G_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_1(t - h_1(t)) - \\ & \left. - \frac{1}{k_1 R_{01}(D)} f_1(t) + \frac{k_m}{k_1 R_{01}(D)} g(t) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_l(t) = & \left(-\frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} u_l(t) + \frac{\Delta Q_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t) - \right. \\ & - \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_m(t) - \frac{G_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)) - \\ & \left. - \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} f_l(t) + \frac{Q_m(D)}{R_{0l}(D)} y_{l-1}(t) \right), \quad l = \overline{2, r}. \end{aligned}$$

Следовательно, с учетом (5) имеем $Q_m(D)y_l(t) = 0$. Выразим $u_1(t)$, $u_l(t)$, $l = \overline{2, r}$ из уравнений (15):

$$u_1(t) = \frac{-R_{01}(D)}{R_{01}(D) + \Delta R_1(D)} \left(\frac{\Delta Q_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_1(t) - \frac{N_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_m(t) - \frac{G_1(D)}{k_1 R_{01}(D)} y_1(t - h_1(t)) - \frac{1}{k_1 R_{01}(D)} f_1(t) + \frac{k_m}{k_1 R_1(D)} g(t) \right); \quad (16)$$

$$u_l(t) = \frac{-R_{0l}(D)}{R_{0l}(D) + \Delta R_l(D)} \left(\frac{\Delta Q_l(D)}{k R_{0l}(D)} y_l(t) - \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_{l-1}(t) - \frac{G_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)) - \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} f_l(t) + \frac{Q_m(D)}{R_{0l}(D)} y_{l-1}(t) \right), \quad l = \overline{2, r}.$$

Поскольку в l -м агенте сети $R_{0l}(D) + \Delta R_l(D) = R_l(D)$ — гурвицев полином в силу предположения 2, и $n - m$ производных ошибки слежения $e_l(t)$ стремятся к нулю, то ограниченными являются управляющий сигнал $u_l(t)$, промежуточные сигналы $\varphi_l(t)$, $\bar{\varphi}_l(t)$, переменная $\zeta_l(t)$ и ее производная в силу (14).

Согласно предположению 5 система проектируется без измерений производной сигнала $\zeta_l(t)$, поэтому вместо (14) сигнал $v_l(t)$ сформируем в виде

$$v_l(t) = -\frac{1}{\beta_l} (D + a_{ml}) \bar{\zeta}_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (17)$$

где $\bar{\zeta}_l$ — оценка, получаемая с фильтра [19]

$$\dot{\bar{\zeta}}_l = \overline{F_{0l}} \bar{z}_l(t) + \overline{B_{0l}} (\zeta_l(t) - \bar{\zeta}_l(t)); \quad (18)$$

$$\bar{\zeta}_l(t) = L_2 \bar{z}_l(t), \quad l = \overline{1, r},$$

где $z_l(t) \in R^2$; матрицы $\overline{F_{0l}}$ и $\overline{B_{0l}}$ аналогичны матрицам в соотношении (9) и имеют соответствующие размерности; $L_2 = [1, 0]$, $l = \overline{1, r}$.

Итак, для сети агентов цепочной структуры справедливо следующее утверждение.

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений 1–6, тогда для любого $\delta > 0$ в условии (3) существуют числа $\mu > 0$, $T > 0$ такие, что при $\mu \leq \mu_0$ и $t \geq T$ для системы (1), (8), (9), (12), (17), (18) выполнены целевые условия (3), и все переменные в системе ограничены.

Доказательство утверждения аналогично доказательству устойчивости системы, предложенной в работе [9].

Числовой пример

Рассмотрим сеть идентичных объектов цепочной структуры, состоящую из четырех агентов, последовательно связанных таким образом, что сигнал с синхронизирующей подсистемы поступает только в первый агент, а выход каждого агента является ведущим сигналом следующего агента. Связь односторонняя. Сеть описывается следующими уравнениями с отклоняющимися аргументами:

$$(D^4 + a_{1l}D^3 + a_{2l}D^2 + a_{3l}D + a_{4l})y_l(t) = (b_{0l}D + b_{1l})u_l + (c_{1l}D^3 + c_{2l}D^2 + c_{3l}D + c_{4l})y_{l-1} + (m_{1l}D^3 + m_{2l}D^2 + m_{3l}D + m_{4l})y_l(t - h_l(t)) + f_l(t), \quad l = \overline{1, 4}.$$

Задача управления такой сетью цепочной структуры, как указано выше в предположении 2, решается в условиях неопределенности параметров их математических моделей.

Задан класс неопределенности:

$$2 \leq a_{ql} \leq 8, \quad 20 \leq b_{0l} \leq 50, \\ -2 \leq c_{1l} \leq 10, \quad 1 \leq m_{ql} \leq 25, \quad l, q = \overline{1, 4}.$$

Уравнение синхронизирующей подсистемы имеет вид

$$(D + a_{ml})^3 y_m(t) = 10g(t).$$

Согласно алгоритмам управления, предложенным в данной работе: $T_l(\lambda) = (\lambda + a_{ml})^2$, $\beta = 50$, $\mu = 0,01$, $a_{m1} = a_{m2} = 5$, $a_{m3} = 2$, $a_{m4} = 4$; запаздывания $h_1(t) = 1$, $h_2(t) = 3$, $h_3(t) = 4$, $h_4(t) = 1$; вспомогательные контуры (12) $(D + a_{ml})\bar{e}_l(t) = 50v_l(t)$, $l = \overline{1, 4}$; уравнения наблюдателей (9) и (18) имеют вид

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_{1l}(t) = \varsigma_{2l}(t) + \frac{6}{\mu} (v_l(t) - \varsigma_{1l}(t)), \\ \dot{\zeta}_{2l}(t) = \frac{8}{\mu^2} (v_l(t) - \varsigma_{1l}(t)), \\ \bar{v}_l(t) = \varsigma_{1l}(t), \quad l = \overline{1, 4}; \\ \dot{z}_l(t) = \frac{a_{ml}}{\mu} (\zeta_l(t) - z_l(t)), \\ \bar{\zeta}_l(t) = z_l(t), \quad l = \overline{1, 4}. \end{cases}$$

Управляющие воздействия (8) и (17) имеют вид

$$u_l(t) = n_{0l}\zeta_{1l}(t) + n_{1l}\zeta_{2l}(t) + n_{2l}\dot{\zeta}_{2l}(t);$$

$$v_l(t) = -\frac{1}{50}(a_{ml}\zeta_l(t) + \dot{\zeta}_l(t)),$$

где n_{0l} , n_{1l} , n_{2l} — коэффициенты полиномов $T_l(\lambda)$, $l = 1, 4$.

Численное моделирование проведено в MATLAB Simulink для сети агентов, математические модели которых описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} (D^4 + 2D^3 + 2D^2 + 2D + 2)y_1(t) = \\ = (40D + 26)u_1 + (2D^3 + 2D^2 + 2D + 2)y_m + \\ + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)y_1(t-1) + f_1(t); \end{aligned}$$

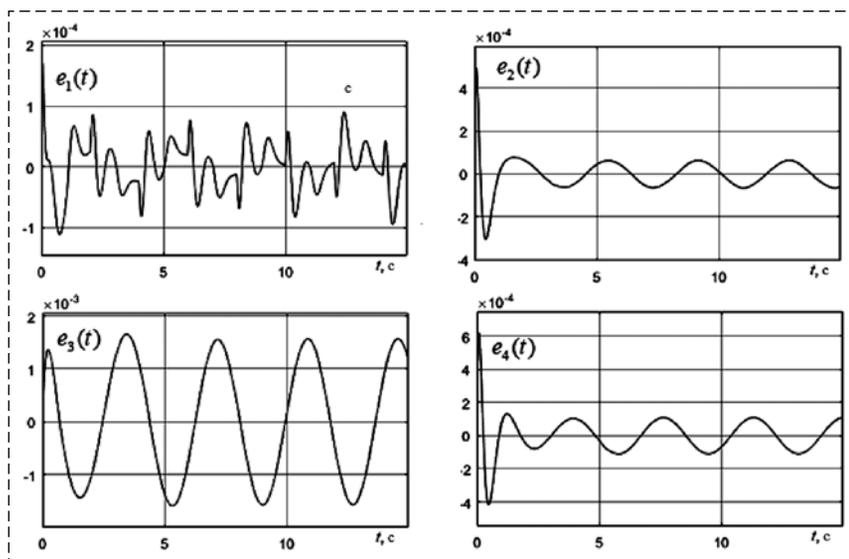
$$\begin{aligned} (D^4 + 3D^3 + 3D^2 + 3D + 3)y_2(t) = \\ = (26D + 35)u_2 + (2D^3 + 2D^2 + 2D + 2)y_1 + \\ + (2D^3 + D^2 + D + 2)y_2(t-3) + f_2(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (D^4 + 10D^3 + 10D^2 + 10D + 10)y_3 = \\ = (26D + 35)u_3 + (2D^3 + 3D^2 + 8D - 2)y_2 + \\ + (2D^3 + 2D^2 + 2D + 2)y_3(t-4) + f_3(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (D^4 + 5D^3 + 5D^2 + 5D + 5)y_4(t) = \\ = (26D + 35)u_4 + (2D^3 - 2D^2 + 8D - 2)y_3 + \\ + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)y_4(t-5) + f_4(t). \end{aligned}$$

Результаты моделирования представлены на рисунке.

Точность $\delta = 0,002$ получена с первой секунды при следующих воздействиях: $g(t) = 10\sin 3t$, $f_1(t) = 10\sin 1,7t$, $f_2(t) = 10\sin 1,7t$, $f_3(t) = 3\sin t$, $f_4(t) = 2\sin 5t$. Начальные условия нулевые.



Переходные процессы по ошибкам слежения $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $e_4(t)$ в агентах
Tracking error $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $e_4(t)$ transients in agents

Заключение

В работе предложен подход к построению робастной сетевой системы цепочной структуры с компенсацией параметрической неопределенности, внутренних и внешних неконтролируемых возмущений. В каждом агенте сети с учетом оценок возмущений и информации о скалярных вход-выходах, компонентах взаимодействия сформированы управляющие воздействия, обеспечивающие достижимость цели управления с требуемой точностью. Результаты численного моделирования в MATLAB Simulink подтвердили теоретические выводы и показали хорошую работоспособность системы управления цепочной структуры.

Список литературы

1. Fax J. A., Murray R. M. Information flow and cooperative control of vehicle formations // IEEE Trans Automat Contr. 2004. N. 9. P. 1465–1476.
2. Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory // IEEE Trans Automat Contr. 2006. N. 51. P. 401–420.
3. Zhang S., Zhang C., Zhang S., Zhang M. Discrete Switched Model and Fuzzy Robust Control of Dynamic Supply Chain Network // Complexity. Vol. 2018. Article ID 3495096. 11 p.
4. IEEE Control Systems Magazine. Special Section "Complex networked Control Systems". Aug. 2007.
5. Кузнецов А. В. Краткий обзор многоагентных моделей // УБС. 2018. № 71. С. 6–44.
6. Проблемы сетевого управления / Под ред. А. Л. Фрадкова. М. Ижевск: ИКИ, 2015. 392 с.
7. Liu K., Selivanov A., Fridman E. Survey on Time-delay Approach to Networked Control // Annual Reviews in Control. 2019. P. 57–79.
8. Фуртат И. Б. Адаптивное и робастное управление мультиагентными системами. СПб.: Изд. Университета ИТМО. 2016. 155 с.
9. Имангазиева А. В. Синхронизация сети нелинейных объектов с запаздыванием по состоянию в условиях неопределенности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 5. С. 266–273.
10. Андриевский Б. Р., Фуртат И. Б. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 1. Методы // Автоматика и телемеханика. 2020. № 9. С. 3–61.
11. Андриевский Б. Р., Фуртат И. Б. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 2. Приложения // Автоматика и телемеханика. 2020. № 10. С. 35–91.
12. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 103–115.
13. Цыкунов А. М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу. М.: Физматлит, 2009. 268 с.
14. Цыкунов А. М. Робастное управление с компенсацией возмущений. М.: Физматлит, 2012. 300 с.
15. Цыкунов А. М. Робастное управление объектами с последствием. М.: Физматлит. 2014. 264 с.

16. **Чугина Ю. В.** Метод вспомогательного контура в задачах управления сетями динамических объектов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург. 2019. 19 с.

17. **Фуртат И. Б., Цыкунов А. М.** Робастное управление нестационарными нелинейными структурно-неопределенными объектами // Проблемы управления. 2008. № 5. С. 2—7.

18. **Имангазиева А. В., Цыкунов А. М.** Робастное управление линейным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 12. С. 2—6.

19. **Atassi A. N., Khalil H. K.** Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1999. V. 44, N. 9. P. 1672—1687.

Chain Network Control with Delay by an Auxiliary Loop Method

A. V. Imangazieva, aliya111@yandex.ru,

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russian Federation

Corresponding author: **Imangazieva Aliya V.** Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: aliya111@yandex.ru

Accepted on July 25, 2022

Abstract

The article is devoted to the development of control algorithms for a network of agents of a chain network, each agent of which is a linear plant with state delay, subject to the action of external disturbances under conditions of a priori uncertainty. In each agent of the network, the output of the previous agent is monitored, and the signal from the leading subsystem arrives only at the first agent of the network, the communication is one-way. Taking into account the time delay in the models of each agent of the network of such a structure makes them close to real ones. In agent control systems, disturbances are compensated by implementing the principle of invariance, namely, in each network agent, compensation for the action of external disturbances acting on the network agent from the outside, as well as internal disturbances caused by various modes of operation of the plant, is carried out by generating a special disturbance signal, and then it subsequent compensation with the help of an auxiliary loop and Khalil observers. A numerical example of a chain network consisting of four linear control plants is given under the conditions of interval uncertainty of the parameters of their mathematical models, state delay and the action of external uncontrolled disturbances. Numerical simulation was carried out in Matlab Simulink. Graphs of transient processes for tracking errors of agents of the chain network are presented, confirming the theoretical conclusions and illustrating the good performance of the control algorithms for the chain network.

Keywords: chain network, robust control, a priori uncertainty, uncontrolled perturbations, control, delay, observer, auxiliary loop

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number 20-08-00610.

For citation:

Imangazieva A. V. Chain Network Control with Delay by an Auxiliary Loop Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 570—576.

DOI: 10.17587/mau.23.570-576

References

1. **Fax J. A., Murray R. M.** Information flow and cooperative control of vehicle formations, *IEEE Trans Automat Contr.*, 2004, no. 9, pp. 1465—1476.

2. **Olfati-Saber R.** Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory, *IEEE Trans Automat Contr.*, 2006, no. 51, pp. 401—420.

3. **Zhang S., Zhang C., Zhang S., Zhang M.** Discrete Switched Model and Fuzzy Robust Control of Dynamic Supply Chain Network, *Complexity*, 2018, vol. 2018, Article ID 3495096, 11 p.

4. **IEEE** Control Systems Magazine. Special Section "Complex networked Control Systems", Aug. 2007.

5. **Kuznetsov A. V.** Brief review of multi-agent models, *UBS*, 2018, no. 71, pp. 6—44 (in Russian).

6. **Fradkov A. L.** ed. Problems of network control, Moscow—Izhevsk, IKI, 2015, 392 p. (in Russian).

7. **Liu K., Selivanov A., Fridman E.** Survey on Time-delay Approach to Networked Control, *Annual Reviews in Control*, 2019, pp. 57—79.

8. **Furtat I. B.** Adaptive and robust control of multi-agent systems, St. Petersburg, Publishing house of ITMO University, 2016, 155 p. (in Russian).

9. **Imangazieva A. V.** Synchronization of a Network of Non-linear Plants with Time Delay as in Condition Under Uncertainty, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 266—273 (in Russian).

10. **Andrievsky B. R., Furtat I. B.** Perturbation Observers: Methods and Applications. Part 1. Methods, *Avtomat. and telemekh.*, 2020, no. 9, pp. 3—61 (in Russian).

11. **Andrievsky B. R., Furtat I. B.** Perturbation Observers: Methods and Applications. Part 2. Applications, *Avtomat. and telemekh.*, 2020, no. 10, pp. 35—91 (in Russian).

12. **Tsykunov A. M.** Robust control algorithms with compensation of bounded perturbations, *Avtomat. and telemekh.*, 2007, no. 7, pp. 103—115 (in Russian).

13. **Tsykunov A. M.** Adaptive and robust control of dynamic plants by output, Moscow, Phys-matlit, 2009, 268 p. (in Russian).

14. **Tsykunov A. M.** Robust control with disturbance compensation, Moscow, Fizmatlit, 2012, 300 p. (in Russian).

15. **Tsykunov A. M.** Robust control of plants with aftereffect, Moscow, Fizmatlit, 2014, 264 p. (in Russian).

16. **Chugina Yu. V.** Auxiliary loop method in the problems of control of networks of dynamic plants, Dissertation abstract for the degree of candidate of technical sciences, St. Petersburg, 2019, 19 p. (in Russian).

17. **Furtat I. B., Tsykunov A. M.** Robust control of non-stationary non-linear structurally indeterminate plants, *Problems of Control*, 2008, no. 5, pp. 2—7 (in Russian).

18. **Imangazieva A. V., Tsykunov A. M.** Robust control of a linear dynamic plant with time delay on state, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2007, no. 12, pp. 2—6 (in Russian).

19. **Atassi A. N., Khalil H. K.** Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems, *IEEE Trans. automat. control*, 1999, vol. 44, no. 9, pp. 1672—1687.

М. А. Бабочкин, аспирант, babochkamisha@mail.ru, **Д. А. Баларев**, ст. преподаватель, balarevda@mpei.ru, **О. С. Колосов**, д-р техн. наук, проф., kolosovos@mpei.ru, Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

Структура и анализ свойств базовых гребенчатых фильтров для автоматических систем

Рассмотрены преимущества использования известных в радиотехнике цифровых гребенчатых фильтров (ГФ) как альтернативы непрерывным корректирующим фильтрам при реализации их в программном обеспечении управляющих контроллеров в системах автоматического управления. Удобство их реализации в контроллерах связано с организацией фиксированного числа пропусков отсчетов в обрабатываемом сигнале. В работе выделены и подробно исследованы свойства двух базовых гребенчатых фильтров первого порядка: фильтра высоких частот и пропорционального (формирующего) фильтра. Характеристики этих фильтров позволяют взять их за основу при реализации более сложных характеристик корректирующих устройств в сочетании с алгоритмами численного интегрирования. Анализ свойств ГФ проводится в частотной области.

Показано, что начальные участки частотных характеристик ГФ при определенных параметрах фильтров хорошо совпадают с непрерывными аналогами таких устройств. Именно эти участки частотных характеристик, ограниченные частотой среза разомкнутой системы, определяют совпадение статических и динамических свойств синтезируемой системы. Показывается, что ГФ снижают до 30 % уровень среднеквадратического отклонения (СКО) равномерно распределенного белого шума на выходе фильтров. Снижение уровня СКО происходит благодаря наличию периодически повторяющихся провалов на амплитудно-частотной характеристике фильтров, образующих так называемую гребенку. Благодаря тому, что рассматриваемые фильтры "вырезают" в спектре выходного сигнала гармоники, кратные обратной величине общей длительности пропускаемых интервалов отсчета, то специальным выбором этой длительности можно не только уменьшить уровень СКО случайного сигнала на выходе ГФ, но одновременно существенно снизить уровень регулярной помехи при ее наличии. Такие фильтры могут быть одновременно использованы в составе демодуляторов сигналов, модулированных по амплитуде.

Ключевые слова: гребенчатый фильтр, частотные характеристики, система управления, белый шум

Введение

Цифровые гребенчатые фильтры (ГФ) на сегодня пока не нашли должного применения в практике автоматического управления в отличие от радиотехники, где они известны достаточно давно. В радиотехнике существует большое число разнообразных цифровых фильтров различных типов и порядков, предназначенных для преобразования высокочастотных сигналов [1–6]. В ГФ, по существу, специально вводится более грубое квантование сигналов за счет пропуска определенного числа отсчетов [4, 5]. Такой прием при анализе свойств фильтров в частотной области демонстрирует дробление оси частот, на которой периодически повторяются амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики исходного фильтра на ограниченных участках частот. В системах управления корректирующие фильтры работают в области низких частот, обеспечивая устойчивость и требуемое качество работы системы. При этом область частот, в которой необходимо обеспе-

чить определенный вид частотной характери-

стики корректирующего фильтра, не более чем на порядок превышает значение частоты среза разомкнутой системы. Именно это условие позволяет вместо традиционного непрерывного фильтра применить цифровой ГФ, если коррекция осуществляется управляющим микропроцессорным контроллером.

Современная управляющая техника на базе микропроцессорных контроллеров (микроконтроллеров) постоянно совершенствуется в направлении скорости и объемов обрабатываемой информации. Достигается этот эффект за счет увеличения тактовой частоты процессора, увеличения его разрядности и объема оперативной памяти [7–10]. Все это позволяет расширить круг задач, в которых микроконтроллер осуществляет реализацию алгоритмов управления в реальном масштабе времени. При этом дискретизация управляющего сигнала на выходе контроллера по уровню и по времени позволяет реализовать численными методами [11, 12] хорошо известные алгоритмы управления, обычно синтезируемые аналоговыми средствами [13, 14]. При этом регуляторы на микроконтроллерах оказываются свобод-

ными от массы известных недостатков, присущих аналоговым регуляторам [10]. Одновременно с этим в динамике систем управления исчезают специфические эффекты, связанные с относительно грубой дискретизацией управляющего сигнала по уровню и по времени, которые были присущи первым управляющим микроконтроллерам.

В силу необходимости обеспечения условий устойчивости, качества и требуемой точности систем в автоматике можно выделить три основных, или базовых, фильтра первого порядка, которые могут быть реализованы не только численными методами в составе программного обеспечения контроллера, но и в виде ГФ. Эти базовые фильтры являются типовыми звеньями систем управления. К ним относятся: интегрирующие, пропорциональные и реальные дифференцирующие звенья. В практике построения корректирующих устройств систем используются как непосредственно базовые фильтры (звенья), так и их сочетания.

Как показано в работах [15–17], ГФ могут быть полезными в системах автоматического управления, если их использовать в качестве корректирующих устройств, реализуемых на базе микроконтроллеров. Использование ГФ в системах управления [17] предлагается как альтернатива известным непрерывным корректирующим устройствам (фильтрам), которые в настоящее время реализуются численными методами в программном обеспечении управляющих контроллеров.

Разумное уменьшение частоты дискретизации управляющего сигнала, при которой полоса пропускания непрерывной части разомкнутой системы обеспечивает выполнение условия теоремы Котельникова для сохранения качества системы как непрерывной, позволяет существенно снизить уровень шумовой составляющей в выходном сигнале регулятора [16, 17], а также "вырезать" определенные гармоники спектра выходного сигнала регулятора. Эти полезные свойства ГФ демонстрируются в работах [15–17] на примерах и нуждаются в анализе и обобщении их свойств с общих позиций.

Целью данной работы является обобщение результатов, представленных в работах [15–17], позволяющих сопоставить свойства непрерывных базовых звеньев (фильтров), используемых в системах управления, и альтернативных для них соответствующих ГФ.

Назначение, описания и структурные схемы цифровых ГФ

Как отмечалось выше, предлагаемые к рассмотрению ГФ могут являться альтернативой известным корректирующим устройствам, реализуемым численными методами в программном обеспечении микропроцессорных регуляторов. При надлежащем выборе параметров такие ГФ могут иметь частотные характеристики в полосе пропускания системы, близкие к своим непрерывным аналогам, и помимо этого позволяют уменьшить уровень высокочастотных помех в выходном управляющем сигнале регулятора, а также "вырезать" определенные гармоники в спектре выходного сигнала.

Дальнейшие рассуждения будем проводить, полагая, что любые корректирующие фильтры реализуются быстродействующим контроллером. В качестве примера на рис. 1 представлена структурная схема ПИД регулятора, в котором затененные блоки могут быть реализованы практически как непрерывные фильтры численными методами и как ГФ в качестве альтернативного варианта. Заметим, что ГФ могут использоваться и как самостоятельные корректирующие устройства [17] для последовательной коррекции и коррекции обратными связями, если коррекция осуществляется через контроллер.

На рис. 1 представлены: x и y — входной и выходной сигналы регулятора; блоки с передаточными функциями: интегратора $W_I(s)$, пропорционального усилителя $W_P(s)$ и дифференциатора $W_D(s)$. Кроме этих блоков выходной сигнал ПИД регулятора часто [2] пропускают через дополнительный фильтр низких частот (ФНЧ), представляющий собой инерционное звено с передаточной функцией $W_F(s)$, для дополнительного сглаживания шумовой составляющей. Все эти блоки реализуются в виде

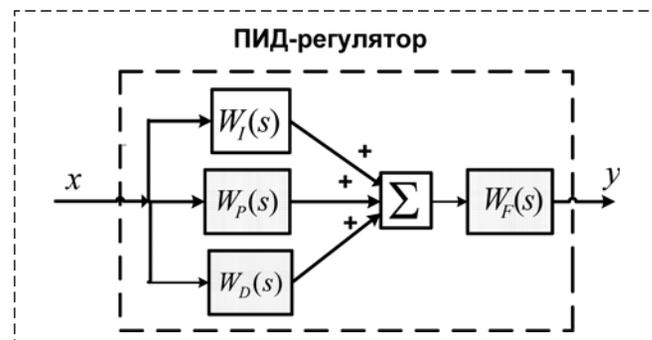


Рис. 1. Структурная схема ПИД регулятора
Fig. 1. Block diagram of the PID controller

программ в контроллере численными методами [2, 5, 6]. Вместе с тем, реализация таких же блоков ПИД регулятора гребенчатыми фильтрами в контроллере несравненно проще в смысле программной реализации и дает дополнительные преимущества в части повышения качества управления [15, 16]. Речь идет о снижении уровня высокочастотной помехи, пропускаемой через них [16], и "вырезании" при необходимости определенных гармоник в спектре выходного сигнала.

Анализ свойств ГФ целесообразно проводить через обратный переход от Z -преобразования в частотную область, как это делается в радиотехнике [11–14]. В противном случае весь анализ сводится к анализу на ограниченной полосе частот, в которую "не помещаются" широкополосные помехи.

В работах [15, 16] для целей управления предлагаются два базовых ГФ первого порядка. Это фильтр высоких частот (ФВЧ) и его непрерывный аналог в виде так называемого реального дифференцирующего звена [7, 8], а также ФНЧ и его аналог в виде аperiodического (инерционного) звена. В статье [16] показывается, что для целей управления ФНЧ целесообразно получать, используя ФВЧ и добавляя к нему операцию интегрирования численными методами. Таким образом, интерес представляет всесторонний анализ ФВЧ.

Помимо названных двух фильтров для целей управления представляет интерес используемый в радиотехнике [12, 13] пропорциональный (формирующий) фильтр (ПФ). В режиме пропуска части отсчетов он также является ГФ со всеми отмеченными выше особенностями таких фильтров. В частности, в области низких частот его характеристики соответствуют характеристикам пропорционального звена.

Что касается операции интегрирования, то, как показано в статье [16], для целей управления нет смысла отказываться от численных методов при реализации ее в контроллере в пользу цифровой фильтрации. Цифровые фильтры более высоких порядков для задач управления мало пригодны, так как их использование сопряжено с проблемами обеспечения устойчивости систем.

Непрерывными аналогами рассматриваемых в данной работе цифровых ГФ являются:

— непрерывный ФВЧ в виде реального дифференцирующего звена с передаточной функцией вида

$$W_D(s) = \frac{K_D s}{T_D s + 1}, \quad (1)$$

где K_D — коэффициент передачи фильтра; T_D — эквивалентная постоянная времени аналогового фильтра; s — оператор дифференцирования;

— пропорциональный (формирующий) фильтр (ПФ) в виде простого пропорционального звена с передаточной функцией вида

$$W_P(s) = K_P; \quad (2)$$

— непрерывный ФНЧ в виде аperiodического (инерционного) звена:

$$W_F(s) = \frac{K_P}{T_P s + 1}, \quad (3)$$

где K_P — коэффициент передачи фильтра; T_P — эквивалентная постоянная времени непрерывного фильтра, причем здесь индекс "P" подчеркивает, что такой фильтр используется в пропорциональном канале регулятора для ослабления шумовой составляющей.

Передаточные функции соответствующих цифровых аналогов фильтров (1), (2) и (3) имеют следующий вид [16]:

— передаточная функция ФВЧ

$$W_D(s) = (1 - e^{-s\tau}) \frac{K_D}{\tau} = (1 - e^{-s\tau}) \frac{K_D}{2T_D}, \quad (4)$$

где $\tau = m\Delta t_c$ — транспортное запаздывание или интервал пропуска, равный m отсчетам Δt_c входного сигнала. Соотношение $\tau = 2T_D$, определяющее число пропусков отсчетов m , обосновывается [15, 16] путем приравнивания максимальных значений АЧХ фильтров (1) и (4) в области высоких частот;

— передаточная функция ПФ

$$W_P(j\omega) = (1 + e^{-j\omega\tau}) \frac{K_P}{2}; \quad (5)$$

— передаточная функция ФНЧ

$$W_F(j\omega) = \frac{1}{s} (1 - e^{-j\omega\tau}) \frac{K_P}{2T_P}. \quad (6)$$

В таблице представлены варианты включения непрерывных фильтров и их цифровых эквивалентов в виде ГФ в состав блоков ПД регулятора.

В соответствии с результатами исследований, представленных в работах [16, 17], наибольший интерес для целей управления представляют

Блоки ПД	Непрерывный фильтр	Гребенчатый фильтр
$W_p(s)$	K_p	$\frac{K_p}{2}(1 + e^{-s\tau})$
	$\frac{K_p}{T_F s + 1}$	$\frac{K_p}{2T_D s}(1 - e^{-s\tau})$
$W_D(s)$	$\frac{K_D s}{T_D s + 1}$	$\frac{K_D}{2T_D}(1 - e^{-s\tau})$
$W_F(s)$	1	$\frac{1}{2}(1 + e^{-s\tau})$
	$\frac{1}{T_F s + 1}$	$\frac{1}{2T_F s}(1 - e^{-s\tau})$

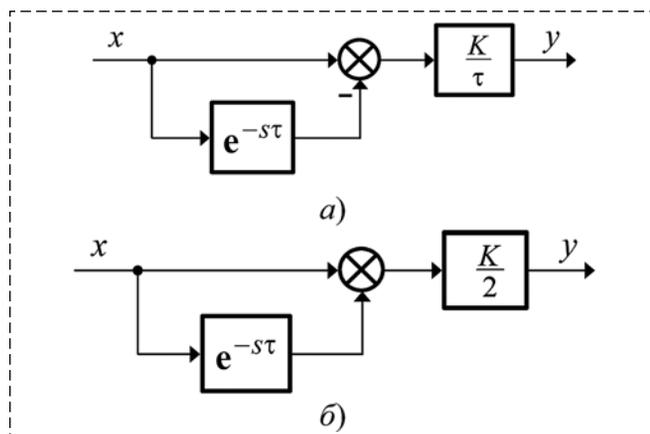


Рис. 2. Структурные схемы ГФ:

a — схема ФВЧ; б — схема ПФ

Fig. 2. Block diagrams of comb filters:

a — diagram of the HCF; б — diagram of FF

два вида ГФ первого порядка из рассмотренных выше трех фильтров. Мы подробнее остановимся на ФВЧ и ПФ. Что касается ФНЧ, то он несущественно отличается по своей эффективности для обозначенных нами целей от своего непрерывного аналога в виде апериодического звена. Исключение составляет только его способность "вырезать" частоты, кратные обратной величине общей длительности пропускаемых отсчетов. Поэтому мы в этой работе специально подробно останавливаться на нем не будем.

На рис. 2 представлены структурные схемы ФВЧ (рис. 2, а) и ПФ (рис. 2, б).

Несложно получить структурную схему ФНЧ, если ввести в схему рис. 2, а, интегрирующее звено на входе или выходе.

Особенности частотных характеристик ГФ

Для выяснения этих особенностей целесообразно рассмотреть нормированные комплексные коэффициенты передачи анализируемых фильтров. Существо нормирования в данном случае сводится к приравнению единице общих фиксированных и независимых от частоты коэффициентов в передаточных функциях фильтров (4) и (5). Полагаем, что в соотношении (4) $\frac{K_D}{\tau} = \frac{K_D}{2T_D} = 1$, а в соотношении (5) $\frac{K_P}{2} = 1$.

Тогда:

— для ФВЧ

$$W_{D_0}(j\omega) = 1 - e^{-j\omega\tau} = \left| 2 \sin \frac{\omega\tau}{2} \right| e^{-j\frac{\omega\tau}{2} + j\frac{\pi}{2}}; \quad (7)$$

— для ПФ

$$W_{P_0}(j\omega) = 1 + e^{-j\omega\tau} = \left| 2 \cos \frac{\omega\tau}{2} \right| e^{-j\frac{\omega\tau}{2}}. \quad (8)$$

Здесь индекс "0" в обозначениях передаточных функций обозначает их нормированную форму.

Амплитудно-фазовые частотные характеристики (годографы АФЧХ) этих нормированных фильтров (7) и (8) представлены на рис. 3.

Отметим идентичность представленных на рис. 3 годографов фильтров с нормированными комплексными коэффициентами передач. Отличие их друг от друга заключается только в положении точек концов векторов в окрестностях нулевых частот. Эти точки диаметрально противоположны.

Закономерности изменений частотных характеристик этих фильтров демонстрирует

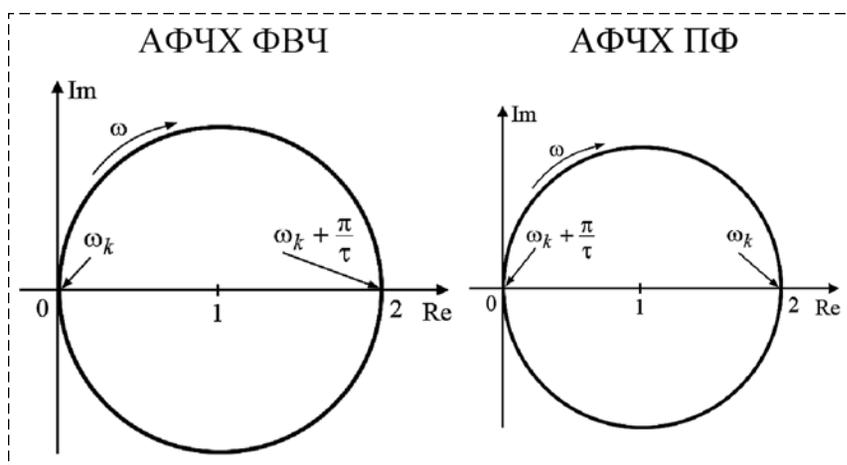


Рис. 3. Годографы нормированных фильтров ФВЧ и ПФ

Fig. 3. Hodographs of normalized filters HCF and FF

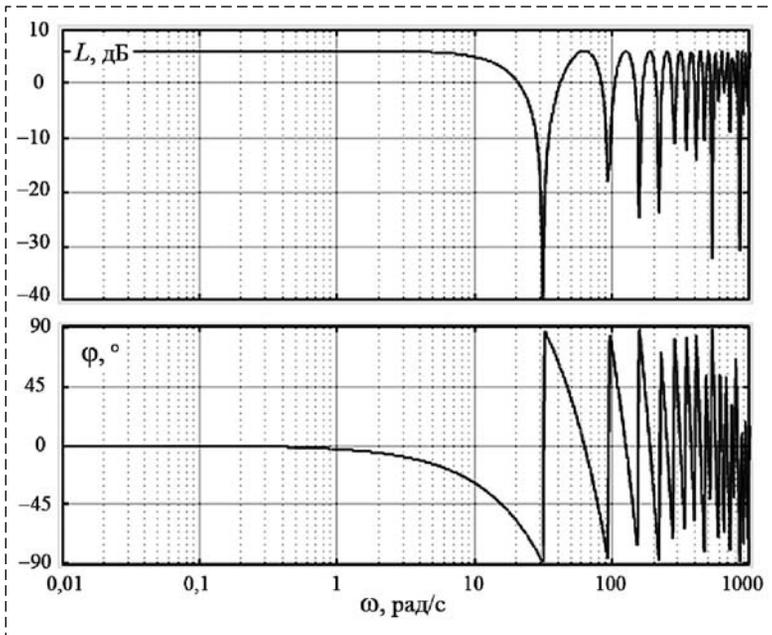


Рис. 4. Логарифмические АЧХ и ФЧХ пропорционального (формирующего) фильтра с $K_p = 1$ и $\tau = 0,2$ с

Fig. 4. Bode diagram of a proportional (forming) filter with $K_p = 1$ and $\tau = 0,2$ s

рис. 4. На нем представлены в логарифмическом масштабе АЧХ и ФЧХ (Bode diagram) ПФ для варианта $K_p = 1$ и $\tau = 0,2$ с.

На рис. 4 просматриваются упомянутые выше провалы на АЧХ, начиная с частоты 31,4 рад/с, которые далее отстоят друг от друга на оси частот через 62,8 рад/с. Эти частоты в общем виде определяются из очевидного соотношения для рассматриваемых фильтров (см. рис. 3):

— для ФВЧ

$$\omega_k = k \frac{2\pi}{\tau}, \quad k = 0, 2, 4, 6, \dots; \quad (9)$$

— для ПФ

$$\omega_k + \frac{\pi}{\tau} = (k + 0,5) \frac{2\pi}{\tau}, \quad k = 0, 2, 4, 6, \dots \quad (10)$$

В окрестностях этих частот гармоники передаваемого через фильтр сигнала уменьшаются по амплитудам. Это и приводит к уменьшению СКО высокочастотных помех в пропускаемом через фильтр сигнале. Несложно показать, что если на рис. 4 ввести фиксированное смещение в оцифровку оси частот на величину 31,4 рад/с, то в результате мы получим АЧХ и ФЧХ, соответствующие ФВЧ с эквивалентной постоянной времени $T_D = 1$ с. При $\tau = 0,2$ с в диапазоне частот $0 < \omega < 62,8$ рад/с характеристики фильтров (1) и (4) практически совпадают. Аналогичный вывод можно сделать

и для ПФ в том случае, если транспортное запаздывание в структуре ПФ будет в два раза меньше транспортного запаздывания в структуре ФВЧ.

При использовании таких фильтров в качестве альтернативы непрерывным аналогам рекомендуется [17] выбирать низшую частоту в соотношении (9) при $k = 1$, сдвигая ее на одну декаду в область высоких частот от частоты среза (ω_{cp}) амплитудно-частотной характеристики разомкнутой системы. В таком случае выполняются не только условия теоремы Котельникова, но и обеспечивается качество переходных процессов такое же, как и при использовании непрерывных аналогов рассматриваемых цифровых фильтров. Отсюда получается соотношение для выбора значения транспортного запаздывания τ :

$$\tau \leq \frac{0,2\pi}{\omega_{cp}}. \quad (11)$$

Оценка СКО на выходе ГФ при равномерно распределенном белом шуме на их входах

Для равномерно распределенного белого шума на входе фильтра СКО его выходного сигнала $\bar{y}(t)$ оценивается как

$$\bar{y}(t) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |W_f(j\omega)|^2 d\omega}. \quad (12)$$

Подстановка в выражение (12) значений модулей передаточных функций как в виде (7), так и в виде (8) дает результат: $\bar{y}(t) = \sqrt{2} = 1,41$.

Учитывая, что фильтры (7) и (8) имеют собственный коэффициент передачи, равный 2, то в нормированном виде получаем

$$\bar{y}_0(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707. \quad (13)$$

Проверим справедливость (13) имитационным моделированием. На рис. 5 представлена структурная схема модели.

Структура модели, представленная на рис. 5, была реализована в MATLAB (Simulink). Параметры генератора белого шума $x(t)$:

- общее время наблюдения T_H (total time) — 10 с;
- мощность шума (noise power) — 0,0001;
- шаг дискретизации (sample time) — 0,001 с.

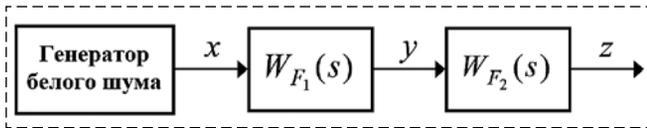


Рис. 5. Структурная схема модели
Fig. 5. Block diagram of the model

Сигнал белого шума $x(t)$ пропускается последовательно через два одинаковых фильтра (ПФ) с передаточными функциями (8). Значение задержки этих фильтров составляет $\tau = 0,1$ с. Расчет СКО (на примере сигнала $y(t)$) для всех наблюдаемых сигналов схемы рис. 5 осуществляется в соответствии с выражением

$$\bar{y}(t) = \sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{2\pi} y^2(t) dt}. \quad (14)$$

Оценки СКО наблюдаемых сигналов в соответствии с (14) составляют

$$\bar{x}(t) = 0,315; \quad \bar{y}(t) = 0,221; \quad \bar{z}(t) = 0,156.$$

Соответственно, в нормированном виде

$$\bar{y}_0(t) = 0,702; \quad \bar{z}_0(t) = 0,706. \quad (15)$$

Расхождения результатов (13) и (15), рассчитанных по соотношениям (12) и (14), не превышают 1 %.

Аналогичные результаты получаются, если используется фильтр с передаточной функцией (7).

На рис. 6 показаны процессы [16] на входе x (кривая 1) и на выходе y (кривая 2) пропорционального (формирующего) фильтра (8). Запаздывание фильтра составляет $\tau = 0,1$ с. На десятой секунде к входному сигналу типа

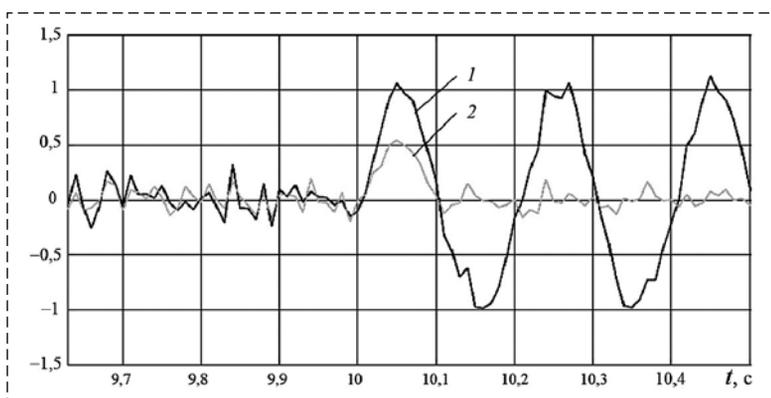


Рис. 6. Сигналы на входе x (кривая 1) и выходе y (кривая 2) формирующего фильтра (6)
Fig. 6. Signals at the input x (curve 1) and output y (curve 2) of the forming filter (6)

"нормально распределенный белый шум" мощностью 0,0001 подключается гармоника амплитудой 1 и частотой 31,4 рад/с (5 Гц). При моделировании используется метод интегрирования Эйлера с фиксированным шагом 0,01 с. Относительно большой шаг взят для лучшей визуализации результата.

На рис. 6 просматривается уменьшение отклонений выходного сигнала фильтра относительно нулевого уровня по сравнению с входным сигналом, а также способность фильтра "вырезать" определенные гармоники входного сигнала. Такие фильтры могут быть одновременно использованы в составе демодуляторов сигналов, модулированных по амплитуде.

Реализация алгоритмов ГФ в контроллере

Вопросы реализации ГФ в микроконтроллере рассмотрены в работах [16, 17]. Благодаря дискретной технике удается без проблем реализовывать блоки точного транспортного запаздывания, чего ранее не удавалось с использованием элементов аналоговой техники. Однако проведенные исследования [16] показывают, что такие операции, как интегрирование и построение с их помощью ФНЧ, целесообразно в задачах управления реализовывать численными методами. Это объясняется тем, что высокочастотные помехи достаточно эффективно ослабляются как интегратором, так и ФНЧ при любом способе их реализации в контроллере, что несложно показать как теоретически, так и имитационным моделированием.

Вместе с тем, следует отметить, что остается технически сложной, но решаемой, задача реализации несмещенного относительно нулевого уровня (двухполярного) выходного сигнала контроллера. Однако этот чисто технический вопрос выходит за рамки данной статьи.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы использования известных в радиотехнике цифровых ГФ как альтернативы непрерывным корректирующим фильтрам при реализации их в управляющих контроллерах в системах автоматического управления. Удобство их реализации в контроллерах связано с орга-

низацией фиксированного числа пропусков отсчетов в обрабатываемом сигнале.

В работе выделены как базовые и подробно исследованы свойства двух типов цифровых ГФ первого порядка: ФВЧ и ПФ. Характеристики этих фильтров могут быть взяты за основу при реализации более сложных характеристик корректирующих устройств в сочетании с алгоритмами численного интегрирования. Анализ свойств ГФ проводится в частотной области.

Показано, что начальные участки частотных характеристик рассматриваемых ГФ достаточно хорошо совпадают с непрерывными аналогами таких устройств. Именно эти участки частотных характеристик, ограниченные частотой среза разомкнутой системы, определяют совпадение статических и динамических свойств синтезируемой системы. Вносимые при этом цифровыми фильтрами искажения сигнала управления из-за искусственного увеличения шага дискретизации не отражаются на динамике и точности системы в замкнутом состоянии. Рассмотренные ГФ снижают уровень СКО равномерно распределенного белого шума на выходе регулятора до 0,707 от уровня СКО белого шума на входе фильтров благодаря наличию периодически повторяющихся провалов на АЧХ фильтров, образующих так называемую гребенку. Благодаря тому, что рассматриваемые фильтры "вырезают" в спектре выходного сигнала гармоники, кратные обратной величине общей длительности пропускаемых интервалов отсчета, специальным выбором этой длительности можно не только уменьшить СКО случайного сигнала на выходе ГФ, но одновременно существенно снизить уровень регуляторной помехи при ее наличии. Такие фильтры могут быть одновременно использованы в составе демодуляторов сигналов, модулированных по амплитуде.

Список литературы

1. **Коберниченко В. Г.** Расчет и проектирование цифровых фильтров. Екатеринбург: Изд-во Урал ун-та, 2015. 64 с.
2. **Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н.** Цифровая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1990. 256 с.
3. **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2003. 464 с.
4. **Лэм Г.** Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация. М.: Мир, 1982. 592 с.
5. **Сорокин Г. А.** Фильтры нижних частот // Вестник ЮУрГУ. Серия "Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника". 2015. Т. 15, № 1. С. 100–107.
6. **Вейцель В. А.** Теория и проектирование радиосистем радиуправления и передачи информации. М.: Горячая линия — Телеком, 2018. 182 с.
7. **Quevedo J., Escobet T.** Digital control: past, present and future of PID control // Proceedings of the IFAC Workshop, Terrassa, Spain, Apr. 2000. P. 5–7.
8. **Денисенко В. В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74; 2007. № 1. С. 78–88.
9. **Astrom K. J., Hagglund T.** Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. 460 p.
10. **Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y.** Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. P. 41–54.
11. **Турчак Л. И.** Основы численных методов. М.: Наука, 1990. 320 с.
12. **Анго А.** Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука. Гл. физ.-мат. лит., 1967. 627 с.
13. **Нетушил А. В.** Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 1976. 420 с.
14. **Ягодкина Т. В., Беседин В. М.** Теория автоматического управления. Для бакалавриата и специалитета. М.: Юрайт, 2018. 470 с.
15. **Колосов О. С., Кошоева Б. Б., Морозов Р. Б.** Дополнительный настраиваемый параметр для ПИД-регулятора (Дифференцирование с увеличенным шагом дискретизации). Кишинев: Palmarium Academic Publishing, 2016. 135 с.
16. **Бабочкин М. А., Колосов О. С., Кузнецова А. А.** Снижение мощности высокочастотных помех в сигнале управления автоматических систем гребенчатыми фильтрами. // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С 91–100.
17. **Бабочкин М. А., Колосов О. С., Кузнецова А. А.** Динамика непрерывных систем управления с элементами запаздывания в составе корректирующих фильтров // Вестник МЭИ. 2021. № 1. С 76–85.

Structure and Analysis of Properties of Basic Comb Filters for Automatic Systems

M. A. Babochkin, babochkamisha@mail.ru, **D. A. Balarev**, balarevda@mpei.ru, **O. S. Kolosov**, kolosovos@mpei.ru, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation

Corresponding author: Kolosov Oleg S., Dr. of Tech. Sc., Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: kolosovos@mpei.ru

Accepted on August 5, 2022

Abstract

The paper considers the issues of using comb filters (CF), known in radio engineering, as an alternative to continuous corrective filters, when they are implemented in controllers in automatic control systems. The convenience of their implementation in controllers is associated with the organization of a fixed number of sample passes in the processed signal. In

this paper, the properties of two types of comb filters of the first order are highlighted and studied in detail: a high-frequency filter and a proportional (forming) filter. The characteristics of these filters are taken as a basis for the implementation of more complex characteristics of corrective devices in combination with numerical integration algorithms. The analysis of the properties of CF was carried out in the frequency domain. It is shown that the initial sections of the frequency characteristics of the CF at certain filter parameters coincide well with the continuous analogues of such devices. It is these areas of frequency characteristics, limited by the cutoff frequency of the open system, that determine the coincidence of static and dynamic properties of the synthesized system. It is shown that CF reduces on 30 % the level of the standard deviation (RMS) of uniformly distributed white noise at the filter output. The decrease in the level of RMS occurs due to the presence of periodically recurring dips in the amplitude-frequency response (frequency response) of filters forming a so-called comb. Due to the fact that the filters in question "cut out" harmonics in the output signal spectrum that are multiples of the inverse of the total duration of the transmitted reference intervals, then a special choice of this duration can not only reduce the level of the random signal at the CF output, but at the same time significantly reduce the level of regular interference, if it is present. Such filters can be simultaneously used as amplitude modulated signal demodulators.

Keywords: comb filter, frequency characteristics, control system, white noise

For citation:

Babochkin M. A., Balarev D. A., Kolosov O. S. Structure and Analysis of Properties of Basic Comb Filters for Automatic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 577–584.

DOI: 10.17587/mau.23.577-584

References

1. **Kobernichenko V. G.** Calculation and design of digital filters, Yekaterinburg, Ural University Publishing House, 2015, 64 p. (in Russian).
2. **Goldenberg L. M., Matyushkin B. D., Polyak M. N.** Digital signal processing, Moscow, Radio and Communications, 1990, 256 p. (in Russian).
3. **Baskakov S. I.** Radio engineering circuits and signals: textbook for students studying in the specialty "Radio engineering", Moscow Higher school, 2003, 464 p. (in Russian).
4. **Lam G.** Analog and digital filters. Calculation and implementation, Moscow, Mir, 1982, 592 p. (in Russian).
5. **Sorokin G. A.** Low-pass filters, *Bulletin of SUSU. The series "Computer technologies, control, radio electronics"*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 100–107. (in Russian).
6. **Veitsel V. A.** Theory and design of radio systems for radio control and information transmission, Moscow, Hotline—Telecom, 2018, 182 p. (in Russian).
7. **Quevedo J., Escobet T.** Digital control: past, present and future of PID control, *Proceedings of the IFAC Workshop*, Terrassa, Spain, Apr. 2000, pp. 5.
8. **Denisenko V. V.** PID regulators: principles of construction and modification, *Modern automation technologies*, 2006, no. 4, pp. 66–74; 2007, no. 1, pp. 78–88 (in Russian).
9. **Astrom K. J., Hagglund T.** Advanced PID control, ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006, 460 p.
10. **Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y.** Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art, *IEEE Control Systems Magazine*, Feb. 2006, pp. 41–54.
11. **Turchak L. I.** Fundamentals of numerical methods: Textbook manual, Moscow, Nauka, 1990, 320 p. (in Russian).
12. **Ango A.** Mathematics for electrical and radio engineers. With a preface by Louis De Broglie, Moscow, Nauka, Gl. phys.-mat. lit., 1967, 627 p. (in Russian).
13. **Netushil A. V.** Theory of automatic control, Edited by A. V. Netushil, Moscow, Higher school, 1976, 420 p. (in Russian).
14. **Yagodkina T. V., Besedin V. M.** Theory of automatic control. For bachelor's degree and specialty, Moscow, Yurayt Publishing House, 2018, 470 p. (in Russian).
15. **Kolosov O. S., Kozhaeva B. B., Morozov R. B.** An additional configurable parameter for the PID controller. (Differentiation with increased sampling step), Kishinev, Publishing house "Palmarium Academic Publishing", 2016, 135 p. (in Russian).
16. **Babochkin M. A., Kolosov O. S., Kuznetsova A. A.** Reducing the power of high-frequency interference in the control signal of automatic systems with comb filters, *Bulletin of the MEI*, 2020, no. 6, pp. 91–100. (in Russian).
17. **Babochkin M. A., Kolosov O. S., Kuznetsova A. A.** Dynamics of continuous control systems with delay elements as part of corrective filters, *Bulletin of the MEI*, 2021, no. 1, pp. 76–85 (in Russian).

В. А. Костюков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., wkost-einheit@yandex.ru,
М. Ю. Медведев, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., medvmihal@sfnu.ru,
В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., pshichop@rambler.ru,
Южный федеральный университет, г. Таганрог

Алгоритмы планирования сглаженных индивидуальных траекторий движения наземных роботов*

Обсуждается разработка алгоритма построения траектории робототехнической платформы, движущейся в среде с препятствиями. Алгоритм основан на применении специальной локальной процедуры оптимизации на каждом шаге планирования и позволяет получать более адекватные в физическом смысле программные траектории без увеличения вычислительной сложности алгоритмов по сравнению с имеющимися методами. Алгоритм базируется на применении модернизированного метода потенциальных полей и последующем сглаживании получившейся траектории. Модернизация метода потенциальных полей заключается в обосновании параметров отталкивающего и притягивающего многообразий и новом способе детектирования и избегания локальных минимумов. При обнаружении локального минимума с помощью специального геометрического критерия алгоритм добавляет на карту дополнительное препятствие, что позволяет избежать его при дальнейшем планировании траектории. Для обхода препятствий, которые могут быть аппроксимированы многоугольниками, предложен метод эффективной точки до препятствия, являющейся эквивалентом последнего по отношению к текущему расположению движущейся робототехнической платформы при применении данного метода планирования.

Предложена двухэтапная методика сглаживания кусочно-линейной траектории. Предполагается, что имеется исходная неоптимальная кривая, найденная любым методом планирования. Данная кривая оптимизируется с использованием функционала, включающего длину траектории и отклонение оптимизированной кривой от исходной кривой. На втором этапе осуществляется сопряжение линейных отрезков планируемой прямой кривыми второго порядка. В результате планируемая траектория движения представляет собой квадратично-линейную кривую с гладкой функцией траекторной скорости. При этом предложенный способ сопряжения прямолинейных участков траектории не требует резких изменений скорости при прохождении поворотов.

Рассматриваются и обсуждаются результаты моделирования, подтверждающие эффективность предлагаемой методики планирования траекторий движения роботов.

Ключевые слова: планирование траекторий, гладкие траектории, локальные минимумы, робототехническая платформа, двумерная среда

Введение

Построение траектории робототехнической платформы (РТП) в картографированной среде позволяет использовать разные алгоритмы планирования, включая алгоритмы A^* [1, 2], D^* [3], случайных деревьев [4, 5], дорожных карт [6], потенциальных полей [7–9], неустойчивых режимов [10, 11]. Указанные алгоритмы формируют, как правило, негладкие траектории, которые могут включать участки с осцилляциями. Для сглаживания таких траекторий необходимо применять отдельные алгоритмы. Также при планировании необходимо учиты-

вать скоростной режим движения, определяющийся техническими характеристиками РТП [12]. Особенно важно, чтобы планируемая траектория была реализуемой в ситуации, когда робот действует в группе, поскольку отклонение от заданного пути может приводить к коллизиям [13–16].

Предлагаемый в данной статье подход работает в непрерывном пространстве, однако для получения траектории первого приближения может осуществляться разбиение исходного пространства на дискретные ячейки [17–19]. Пространственная декомпозиция позволяет применять методы дискретного поиска, базирующиеся на теории графов; наибольшую популярность получили упомянутые выше алгоритмы семейств A^* и D^* [1–3].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-29-00370.

Алгоритм A^* является развитием алгоритма Дейкстры, в котором с помощью эвристической функции стоимости пути снижена вычислительная сложность. Вместе с тем, алгоритм требователен к памяти, и число расчетов резко растет с ростом числа ячеек разбиения. Для снижения требовательности алгоритма A^* к памяти и его вычислительной сложности разработаны алгоритмы с итеративным углублением [20], A^* с ограничением памяти [21], иерархический A^* [22], A^* с динамическим изменением весов ребер [23, 24].

Более простым является метод потенциальных полей. Он позволяет планировать маршрут в динамических средах, а также получать более гладкие траектории [25–27]. Ограничением метода потенциальных полей является наличие локальных минимумов, из которых выходят с использованием отдельных алгоритмов [11, 25]. Кроме того, отталкивающие и, возможно, притягивающие функции лишь частично отражают физические аналоги и отличаются достаточной сложностью, не позволяющей использовать локальные процедуры оптимизации на каждом шаге движения. Преимущество использования таких процедур возможно и эффективно, если используется простой функционал, учитывающий правильно обоснованные факторы планирования, с адекватно определяемыми коэффициентами настройки.

В связи с изложенными проблемами предлагается использовать модернизированный алгоритм потенциальных полей, который позволяет избегать локальных минимумов. Для этого детектируется явление "зацикливания вокруг точки" и назначаются дополнительные препятствия в точках обнаруженных минимумов. Для учета влияния формы препятствий предлагается новый метод эффективной точки, являющейся эквивалентом таких препятствий по отношению к текущему расположению движущейся РТП.

Для построения сглаженных траекторий предлагается методика минимизации пространственной кусочно-линейной кривой по длине с последующим скруглением участков при вершинах дугами окружностей.

Постановка задачи

Рассматривается двумерная прямоугольная среда с препятствиями, представленная на

рис. 1 (см. третью сторону обложки). Отдельные препятствия представлены в виде выпуклых многоугольников, однако они могут образовывать сложные конфигурации, включая невыпуклые фигуры.

Полагается, что путь из текущего в целевое положение существует. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) красной штриховой линией показана траектория первого приближения, которая строится модифицированным методом потенциальных полей. Зеленой сплошной линией представлена оптимизированная траектория. Дискретность исходной кривой обусловлена частотой обновления траектории движения.

Целью данной статьи является разработка простого и эффективного алгоритма построения глобальной траектории, обеспечивающего обход локальных минимумов на основании детектировании областей этих минимумов с последующим введением соответствующих виртуальных препятствий.

Алгоритм планирования должен сглаживать полученную программную траекторию, не допуская значительных осцилляций при движении в области препятствий. При этом под гладкостью понимается отсутствие значительных осцилляций, возникающих при движении вдоль препятствий, и отсутствие разрывов по скоростям в точках обновления траектории.

Алгоритм планирования с обнаружением локальных минимумов

Разрабатываемый модифицированный метод планирования отличается способом детектирования циклических движений относительно точки локального минимума. После обнаружения такой точки она считается новым препятствием, от которого начинает отталкиваться РТП.

Даны исходная точка $A(x_A, y_A)$ и целевая точка $B(x_B, y_B)$ и препятствия $X_{obs,i}(x_{obs,i}, y_{obs,i})$, $i = 1, 2, \dots, N_{obs}$. Рассмотрим итерационную процедуру, которая на k -м шаге, $k = 1, 2, \dots, K$, K — число итераций, необходимых для достижения окрестности целевой точки, определяет векторное приращение ΔX_k для перехода в следующую точку X_{k+1} : $X_{k+1} = X_k + \Delta X_k$. Пусть модуль приращения $|\Delta X_k| = \Delta r$ на k -м шаге определен и равен $\Delta r_k = v_k \Delta t$, где v_k — траекторная скорость РТП, Δt — интервал времени между соседними отсчетами итерационной процедуры. Требуется максимизировать функционал

$$\Phi(X_{k+1}) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} \delta_{ik} |X_{k+1} - X_{obs,i}|^2 - \delta_{B,k} |X_{k+1} - X_B|^2 \rightarrow \max, \quad (1)$$

при условии $|X_{k+1} - X_k|^2 = \Delta r^2 = v_k^2 \Delta t^2 = \text{const}$. Первое слагаемое в (1) — взвешенная сумма квадратов $|X_{k+1} - X_{obs,i}|^2$ расстояний до препятствий с весовыми коэффициентами $0 \leq \delta_{ik} \leq 1$. Второе слагаемое (1) — расстояние до целевой точки, весовой коэффициент $0 \leq \delta_{B,k} \leq 1$ определяется адаптивно, причем справедливо условие нормировки на каждом k -м шаге:

$$\sum_{i=1}^{N_{obs}} (\delta_{ik} + \delta_{B,k}) = 1. \quad (2)$$

Решение приведенной задачи дает следующее выражение для X_{k+1} :

$$X_{k+1} = X_k - \frac{v_k \Delta t [F_{1k}; F_{2k}]^T}{\sqrt{F_{1k}^2 + F_{2k}^2}}; \quad (3)$$

$$F_{1k} = (\tilde{x}_{obs,k} - x_k)(1 - \delta_{B,k}) + \delta_B(x_k - B), \quad (4)$$

$$F_{2k} = (\tilde{y}_{obs,k} - y_k)(1 - \delta_{B,k}) + \delta_B(y_k - B),$$

$$[\tilde{x}_{obs,k}; \tilde{y}_{obs,k}] = \sum_{i=1}^{N_{obs}} \delta_{ik} X_{obs,i} / (1 - \delta_{B,k}). \quad (5)$$

Для определения весовых коэффициентов δ_{ik} , $i = 1, 2, \dots, N_{obs}$, и $\delta_{B,k}$ выделим две вложенные окрестности $U_{pr,i1}$ и $U_{pr,i2}$ с общим центром в точке i -го препятствия и радиусами $R_{pr,1} < R_{pr,2}$. Нахождение в окрестности $U_{pr,1}$ считается наиболее опасным. Индекс i в обозначении указанных окрестностей далее опускаем в силу их взаимной конгруэнтности между собой.

На k -й итерации детектируем препятствия, для которых обеспечено вхождение текущей точки X_k в их большие окрестности $U_{pr,i2}$, используя условия

$$|X_k - X_{obs,ul}| < R_{pr,2}, \quad (6)$$

где u_{kl} , $l = 1, 2, \dots, L_k$, — множество номеров этих препятствий. Если это множество пустое, то движение осуществляется в направлении целевой точки, поэтому весовые коэффициенты назначаются следующим образом: $\delta_{B,k} = 1$, $\delta_{ik} = 0$, $i = 1, 2, \dots, N_{obs}$. Если это множество непустое, то определяется ближайшее к текущей точке препятствие с номером $i' = u_{kl}$ (для некоторого $l' \leq L_k$), и затем анализируется, попадает ли текущая точка в меньшую окрестность

этого препятствия, т. е. проверяется выполнение условия

$$|X_k - X_{obs,i'}| < R_{pr,1}. \quad (7)$$

При выполнении условия (7) для весового коэффициента $\delta_{B,k}$ назначается значение $\delta_{B,\min} \ll 1$, а коэффициенты δ_{ik} определяются по формулам, учитывающим расстояния от точки X_k до препятствий из множества u_{kl} :

$$\delta_{ik} = \xi_k |X_k - X_{obs,u_{kl}}|^{-1}; \quad (8)$$

$$\xi_k = (1 - \delta_{B,\min}) / \sum_{i=1}^{L_k} |X_k - X_{obs,u_{kl}}|^{-1}, \quad (9)$$

и использовано условие нормировки (2). Если точка X_k не входит в меньшую окрестность $U_{pr,i1}$ ближайшего препятствия, т. е. условие (7) не выполняется, то назначается $\delta_{B,k} = \delta_{B,\text{mean}} > \delta_{B,\min}$, а коэффициенты δ_{ik} определяются по выражениям (8) и (9) с заменой $\delta_{B,\min}$ на $\delta_{B,\text{mean}}$.

Далее коэффициент $\delta_{B,k}$ корректируется в соответствии с выражением

$$\delta'_{B,k} = \delta_{B,k} R_B / |X_k - X_B|. \quad (10)$$

Здесь R_B — характерное расстояние до целевой точки, такое что при $|X_k - X_B| > R_B$ коэффициент $\delta'_{B,k}$ начинает гиперболически зависеть от $|X_k - X_B|$ и поэтому значительно растет при приближении к целевой точке. Соответствующие модернизированные формулы для расчета F_{1k} , F_{2k} получаются из (4) заменой $\delta_{B,k}$ на коэффициент $\delta'_{B,k}$ (10).

Скорость робота v_k варьируется следующим образом. Вводится окрестность препятствия, которую не должна пересекать РТП. Для выполнения этого условия проверяется, находится ли точка X_k в пределах радиуса торможения $R_{br} > R_{pr,1}$. Если условие $R_{br} > R_{pr,1}$ выполняется, то рассчитывается время Δt_{br} , которое необходимо для торможения с постоянным ускорением. Если это время меньше времени дискретизации итерационной процедуры $\Delta t_{br} < \Delta t$, то модуль скорости на следующей итерации уменьшается так, чтобы обеспечить равенство $\Delta t_{br} = \Delta t$. Таким образом, модуль скорости v_k изменяется в зависимости от условий движения в малой окрестности препятствия. Режим принудительного торможения позволяет учитывать особенности РТП, в том числе максимально возможное ускорение, путем варьирования радиуса R_{br} .

В предлагаемой методике используются простые выражения для притягивающих и отталкивающих сил, позволяющие оптимизировать локальный функционал, в результате чего находят вектор смещения к следующей точке пути. Весовые коэффициенты этого функционала имеют физический смысл и адаптивно перестраиваются.

Для обхода локальных минимумов вначале задается максимальное число шагов N_{iter} , за которое РТП должна достичь цели. Далее применяется метод потенциальных полей. Если объект не достигает цели, то считается, что он попал в локальный минимум. В этом случае находится область локального минимума. Вводится виртуальное круговое препятствие, которое включает окрестность локального минимума. Определяется ближайшая к этому препятствию точка X'_{near} траектории, из которой необходимо продолжить движение. Для того чтобы часть траектории в окрестности точки X'_{near} не пересекла виртуальное препятствие, целесообразно отстраиваться от его границы, т. е. если $X'_{\text{near}} = X(i'')$, то исходная точка уточняется следующим образом: $X'_{\text{near}} = X(i')$, где $i' = i'' - \Delta i$, $\Delta i < i''$, Δi — натуральное положительное число.

Точка X'_{near} считается исходной для планирования пути по методу потенциальных полей на первой итерации с виртуальным препятствием.

Может оказаться так, что РТП вновь попадет в тот же локальный минимум, если не удалось достаточно точно его детектировать. Тогда строится уточненное виртуальное препятствие, соответствующее данному минимуму. Может быть случай, когда РТП успешно минует этот минимум и попадает в другой. В этих случаях все действия, рассмотренные выше, повторяются.

Условие выхода из локального минимума за конечное число итераций — принадлежность каждой промежуточной начальной точки нового участка траектории уже имеющейся траектории, смещенной в сторону точки старта A .

Пусть n_0 — число узлов конечного участка траектории при попадании в область локального минимума. Рассчитаем среднюю точку $X_{\text{mean},0} = \frac{1}{n_0 + 1} \sum_{j=N-n_0}^N X(x_j, y_j)$ по совокупности последних n_0 узлов. Здесь N — число всех узлов траектории.

Максимальное отклонение $\Delta X_{\text{max},0}$ этих точек от среднего $X_{\text{mean},0}$ равно

$$\Delta X_{\text{max},0} = \sqrt{\frac{1}{n_0 + 1} \sum_{i=N-n_0}^N [X(x_i, y_i) - X_{\text{mean},0}]^2}. \quad (11)$$

Введем меру осцилляций участка траектории в виде среднего изменения $\Delta \psi_s$ угла рысканья, которое оценивается в соответствии с выражением

$$\Delta \psi_s(i_1, i_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=i_1}^{i_2} \Delta \psi_i^2}{N'}}, \quad (12)$$

где $N' = i_2 - i_1 + 1$ — число точек обновления траектории; i_1, i_2 — номера узлов траектории, образующих ее участок; $\Delta \psi_i$ — приращение угла рысканья на i -м шаге обновления траектории. Значение меры (12) для конечного участка траектории в составе n_0 последних узлов обозначим $\Delta \psi_{s,0} \equiv \Delta \psi_s(N - n_0, N)$.

Рассмотрим множества новых точек исходной траектории:

$$\{X(x_i, y_i)\}, \quad i = N - n_0 - n_2(k - 1), \dots, N, \quad (13)$$

где $k = 1, 2, \dots, K < N$, $n_2 = 0, 1, 2, \dots$ — шаг приращения по числу точек.

Для каждого такого набора определены величины

$$X_{\text{mean},k} = \frac{1}{(n_0 - n_2(k - 1) + 1)} \sum_{i=N-n_0-n_2(k-1)}^N X(x_i, y_i); \quad (14)$$

$$\Delta X_{\text{max},k} = \sqrt{\frac{1}{(n_0 - n_2(k - 1) + 1)} \times \sum_{i=N-n_0-n_2(k-1)}^N [X(x_i, y_i) - X_{\text{mean},k,0}]^2}; \quad (15)$$

$$\Delta \psi_{s,k} = \sqrt{\frac{1}{(n_0 - n_2(k - 1) + 1)} \sum_{i=N-n_0-n_2(k-1)}^{N-n_2(k-1)} \Delta \psi_i^2}. \quad (16)$$

Величина $\Delta \psi_{s,k}$ (16) рассчитывается в "скользящем окне" шириной n_0 , перемещающемся от конца траектории в обратном направлении.

Введем в рассмотрение критерий, учитывающий два фактора — изменение максимального удаления и изменение среднего угла отклонения:

$$K_{\text{eff}}(k) = (\Delta X_{\text{max},k} / \Delta X_{\text{max},0})^2 + (\Delta \psi_{s,0} / \Delta \psi_{s,k})^2. \quad (17)$$

Определим, на каком шаге k' значение критерия (17) превысит заданное значение $K_{\text{eff},kr} > 1$, т. е. выполнится неравенство

$$K_{\text{eff}}(k') > K_{\text{eff},kr}. \quad (18)$$

Согласно выражению (18) до тех пор, пока множества (13) при достаточно малых k находятся в области локального минимума, значение $\Delta X_{\max,k}$ колеблется в малой окрестности значения $\Delta X_{\max,0}$. Кроме того, имеются осцилляции траектории на всех участках, входящих в область локального минимума, но от участка к участку при малых изменениях k в (13) величина $\psi_{s,k}$ меняется слабо. При удалении от локального минимума коэффициент (17) нарастает, поскольку в первом слагаемом величина $\Delta X_{\max,k}$ увеличивается, а $\Delta \psi_{s,k}$ уменьшается, так как уменьшается среднее изменение угла рыскания на участке, порожденном узлами $i = N - n_0 - n_2(k - 1), \dots, N - n_2(k - 1)$.

При достаточно большом значении $K_{eff,kr}$ неравенство (18) становится критерием пересечения границы области локального минимума. При этом возрастает максимальное расстояние от новых точек множества (13) до средней точки $X_{\text{mean},k}$, а осцилляции уменьшаются.

Как только найдено ближайшее множество, удовлетворяющее условию (18), вводится дополнительное виртуальное препятствие с центром и радиусом

$$X_{obs,add} = X_{\text{mean},k}, \quad r_{obs,add} = k_{s2} |X(x_{i'}, y_{i'})|, \quad (19)$$

где $i' = N - n_0 - n_2(k' - 1)$.

Номер исходной точки $X(x_i, y_i)$, совпадающей с X'_{near} , введенной выше, определяется согласно выражению

$$i' = i'' - n_3 = N - n_0 - n_2(k' - 1) - \Delta i, \quad (20)$$

где $\Delta i = [2r_{obs,add}/(V\Delta t)]$; $[\cdot]$ — операция отбрасывания дробной части; V — крейсерская скорость РТП; Δt — шаг дискретизации.

$$[A]_{N-2 \times N-2} = \begin{bmatrix} \delta_1 + 2\delta_2 & -\delta_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -\delta_2 & \delta_1 + 2\delta_2 & -\delta_2 & 0 & \dots & . & 0 & 0 \\ 0 & -\delta_2 & \delta_1 + 2\delta_2 & -\delta_2 & \dots & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & -\delta_2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & . & . & 0 & 0 \\ 0 & . & 0 & \dots & . & \delta_1 + 2\delta_2 & -\delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & . & \dots & 0 & -\delta_2 & \delta_1 + 2\delta_2 & -\delta_2 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\delta_2 & \delta_1 + 2\delta_2 \end{bmatrix}; \quad (23)$$

Для учета формы препятствий внешний контур аппроксимируется выпуклым многоугольником. При нахождении РТП рядом с препятствием рассчитывается расстояние от теку-

щей точки до ближайшей точки многоугольника. Назовем его эффективным расстоянием от текущей точки до препятствия. Далее оно используется в методе потенциальных полей.

Алгоритм уменьшения осцилляций

Пусть имеется начальная траектория движения РТП, представленная точками $A'_i(x'_i, y'_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$. Рассмотрим алгоритм, позволяющий проводить сглаживание этой траектории. Заметим, что сглаживание осцилляций сопряжено с минимизацией длины траектории. Поэтому проблема снижения указанных осцилляций ставится в виде задачи оптимизации функционала

$$G(Tr, p) = \delta_1 \sum_{i=2}^{N-1} [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2] + \delta_2 \sum_{i=2}^{N-1} [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2], \quad (21)$$

где первое слагаемое есть сумма квадратов отклонений координат точек $A_i(x_i, y_i)$ от исходных точек $A'_i(x'_i, y'_i)$, а второе — длина целевой кривой Tr . Коэффициенты $0 \leq \delta_1, \delta_2 \leq 1$ задают степень влияния слагаемых в функционале (21).

Стационарная точка $X_{st}[x_{st,2}, \dots, x_{st,N-1}]^T$, $Y_{st}[y_{st,2}, \dots, y_{st,N-1}]^T$ функционала (21) по переменным $\{x_i, y_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N - 1$ может быть найдена в виде

$$X_{st} = A^{-1}B_X, \quad Y_{st} = A^{-1}B_Y, \quad (22)$$

$$B_x = [\delta_1 x'_2 + \delta_2 x'_1, \delta_1 x'_3, \dots, \delta_1 x'_{N-2}, \delta_1 x'_{N-1} + \delta_2 x'_N]^T; \quad (24)$$

$$B_y = [\delta_1 y'_2 + \delta_2 y'_1, \delta_1 y'_3, \dots, \delta_1 y'_{N-2}, \delta_1 y'_{N-1} + \delta_2 y'_N]^T.$$

Покажем, что в точке (22) выполняется достаточное условие локального минимума по минорам матрицы Гессе при любых значениях δ_1, δ_2 таких, что $0 \leq \delta_1, \delta_2 \leq 1, \delta_G + \delta_L = 1$. Действительно, матрица Гессе для функционала (21) есть блочно-диагональная матрица. Известно, что если каждый из блоков такой матрицы положительно определен, тогда и результирующая блочно-диагональная матрица также будет положительно определенной [30].

Согласно следствию из теоремы Гершгорина [31], для любой симметрической матрицы с положительными элементами на главной диагонали достаточным условием положительной определенности этой матрицы является условие строгого доминирования диагональных элементов. Для симметрической трехдиагональной матрицы Теплица (21) это условие имеет вид

$$|\delta_1 + 2\delta_2| > 2|\delta_2|. \quad (25)$$

А так как по условию $0 \leq \delta_1, \delta_2 \leq 1$, то (23) может быть переписано как

$$\delta_1 + 2\delta_2 > 2\delta_2. \quad (26)$$

Из (26) следует, что достаточным условием локального минимума является условие $\delta_1 > 0$.

Заметим, что в точке (22) достигается и глобальный минимум функционала (21) в силу единственности стационарной точки для этого функционала.

При сглаживании могут быть использованы два условия — требование не пересечения препятствий и не превышение некоторого максимального отклонения σ_{kr} от исходной кривой. Это расхождение имеет смысл среднего значения амплитуды помеховых осцилляций, которые должны быть снижены. Это условие будем записывать в виде

$$\sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^{N-1} [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2]} \leq \sigma_{kr}. \quad (27)$$

Для нахождения траектории минимальной длины с учетом указанных условий используется следующая процедура. Перебираются значения δ_1 в диапазоне $[\delta_{1min}, \delta_{1max}]$, $\delta_{1min} \ll \delta_{1max}$ с шагом $\Delta\delta_1 \ll \delta_{1max}$. Значение δ_{1max} соответствует случаю, когда оптимальное решение без учета указанных двух условий дает кривую, наиболее близкую к кратчайшему пути между точками (x_1, y_1) и (x_N, y_N) . Если оба условия удовлетворяются, то полученное решение будет оптимальным на множестве $\delta_1 \in [\delta_{1min}, \delta_{1max}]$. Если хотя бы

одно из этих условий не выполняется, то нужно перейти к большему значению δ_1 и далее — вновь проверить указанные условия.

Такая процедура повторяется до тех пор, пока не найдется такое значение δ_1 из интервала $[\delta_{1min}, \delta_{1max}]$, при котором удовлетворяются оба указанных выше условия, либо пока не будут исчерпаны все дискретные значения $\{\delta_{1,k}\}$, $k = 1, 2, \dots, K$, соответствующей последовательности.

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) представлен пример нахождения траектории минимальной длины с учетом ограничивающих условий при следующих параметрах: $\sigma_{kr} = 7$ м, длина исходной кусочно-линейной кривой $l_0 = 140,28$ м. Интервал изменения параметра δ_1 $[\delta_{1min} = 0,02; \delta_{1max} = 0,98]$, шаг $\Delta\delta_1 = 0,02$. Полученная длина сглаженной кривой $l_{opt} = 73,87$ м при $\delta_1 = 0,22$ и $\sigma_2 = 7$ м. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) красной кривой изображена исходная кусочно-линейная траектория, синим цветом представлены кривые на итерациях, зелеными точками показаны узловые точки оптимизированной по рассмотренному алгоритму кривой.

Квадратично-линейное сглаживание траектории

После получения кривой с уменьшенными колебаниями проводится ее сглаживание. Для этого применяется аппроксимация прямолинейными отрезками, гладко сопряженными с дугами окружностей [33], строящихся в каждой узловой точке исходной кусочно-линейной кривой.

Для сглаживания траекторий в виде отдельных точек применяются различные приемы, непрерывная линейная интерполяция весов на границе каждой ячейки, что приводит к значительно большему числу базовых точек, а также к значительному увеличению времени планирования [33].

Также необходимо устранять разрывы скоростей во времени. В противном случае планируемые траектории не позволят двигаться без рывков скоростей в узловых точках. Последнее может привести к снижению средней скорости каждой отдельной РТП и группы в целом.

Вторая причина использования гладких временных параметрических представлений индивидуальных траекторий заключается в требовании замедления движения РТП на участках с большой кривизной траектории.

Для решения указанных проблем кривые Безье [34] не подходят, так как они не дают возможности моделировать движение с замедлением на участках с повышенной кривизной. Если параметр кривой Безье считать функцией времени, то возникает нетривиальная задача нахождения этой функции по заданным требованиям. Поэтому для реализации процедуры сглаживания будем использовать два геометрических элемента: прямолинейные отрезки и дуги окружностей, которые стыкуются по касательным. Траекторная скорость на такой объединенной кривой должна быть гладкой функцией времени.

На рис. 2 представлен участок кусочно-линейной кривой, содержащий прямые A_1A_2 и A_2A_3 с базисными точками A_1 , A_2 и A_3 . Этот участок всегда можно заменить дугой некоторой окружности с центром в точке M , радиусом R и двумя прямыми отрезками A_1B , CA_3 , C — точка касания окружности.

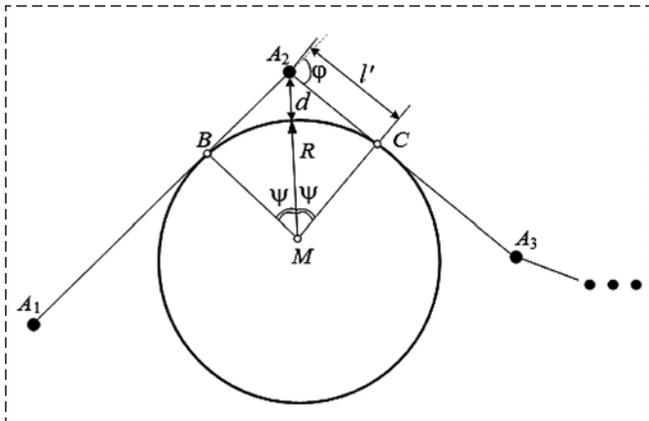


Рис. 2. Геометрия задачи по определению окружности сопряжения

Fig. 2. Geometry of the problem of determining the conjugation circle

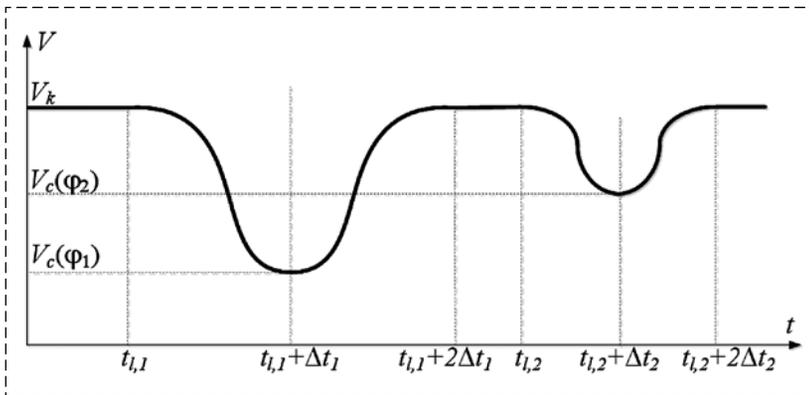


Рис. 3. Изменение планируемой скорости на повороте

Fig. 3. Changes in the planned speed on the turn

Величины R и l' определяются следующими выражениями:

$$l' = \frac{d(1 + \cos \psi)}{\sin \psi}; \quad (28)$$

$$R = l' / \operatorname{tg} \psi, \quad (29)$$

где $\psi = \varphi/2$ — половина угла поворота вектора скорости РТП при переходе с линейного участка A_1B на CA_3 после окончания движения по дуге.

На рис. 3 представлен график изменения планируемой скорости на повороте.

Параметрическое представление участка дуги имеет вид

$$\begin{aligned} x(t) &= x_M + R \cos(s_c(t - t_l) + \alpha), \\ y(t) &= y_M + R \sin(s_c(t - t_l) + \beta), \end{aligned} \quad (30)$$

где t_l — время начала движения по дуге BC ; $s_c(t - t_l)$ — угловое расстояние, пройденное по окружности дуги к моменту времени t , причем $s_c(0) = 0$; α и β — неопределенные постоянные углы.

Для получения гладкой функции скорости будем исходить из следующего требования: на линейных участках скорость РТП постоянна и равна крейсерской скорости V , а на дуговых участках профиль скорости дан обобщенным выражением

$$v(t) = a(\varphi) \cos[\pi(t - t_l)/\Delta t] + b(\varphi), \quad (31)$$

где Δt — половина периода движения по участку BC ;

$$a(\varphi) = 0,5(V - V_c(\varphi)), \quad b(\varphi) = 0,5(V + V_c(\varphi)), \quad (32)$$

$V_c(\varphi)$ — монотонно убывающая функция угла поворота φ , характеризующая минимальное значение скорости, которое должно быть достигнуто на локальном участке движения по дуге.

Непосредственной проверкой легко убедиться в непрерывности функции скорости, задаваемой указанным способом.

Функция $V_c(\varphi)$ при $\varphi = 0$ принимает максимальное значение, равное крейсерской скорости $V_c(0) = V$. При $\varphi = \pi$ скорость принимает минимально возможное для данной РТП значение $V_c(\pi) = V_0$, определяемое ее техническими характери-

ками. Тогда в приближении линейности $V_c(\varphi)$ получим

$$V_c(\varphi) = V - (V - V_0)\varphi/\pi. \quad (33)$$

Целесообразным является введение пропорциональной зависимости между минимально допустимой скоростью на криволинейных участках V_0 и скоростью на линейных участках V . В этом случае выражение (33) принимает вид

$$V_c(\varphi) = V_k[1 - (1 - \eta)\varphi/\pi], \quad (34)$$

где принято, что $V_0 = \eta V$, $\eta = \text{const} < 1$.

При условии (34) половина времени прохождения дугового участка есть

$$\Delta t_c = R\psi/b. \quad (35)$$

Таким образом, на линейном участке РТП движется с постоянной скоростью V , а на повороте скорость косинусоидально спадает до уровня $V_c(\varphi)$ (34). Если минимально допустимая скорость пропорциональна величине V , то минимальная скорость на повороте также пропорциональна V согласно (34).

Отметим, что алгоритм уменьшения осцилляций может сглаживать как нежелательные осцилляции, так и колебания, связанные с маневрами уклонения и обхода препятствий. Необходимо рассматривать расстояние $d_{\min, \text{line}}$ минимального прямолинейного участка траектории одиночной РТП. Вся исходная кривая разбивается на участки, длина каждого из которых равна примерно $d_{\min, \text{line}}$. Далее для каждого участка решается задача минимизации осцилляций, при этом граничные точки выделенных участков являются неподвижными в процессе оптимизации. После этого полученная кусочно-ломаная кривая подвергается квадратично-линейному сглаживанию.

Результаты численного моделирования

При моделировании создана среда размером 1000×1000 м, на которой генерируются тетрагональные препятствия. Точка старта и цели выделены красными кружками. Траекторная скорость и шаг времени моделирования равны: $V = 6$ м/с, $\Delta t = 1$ с. Максимальное число шагов, отводимое на одну итерацию, подобрано экспериментально и составило $M = 500$. Число узлов конечного участка траектории и переменного участка "скользящего окна", ис-

пользуемых в процедуре обхода локальных минимумов, $n_0 = 60$.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлен случай, когда планирование применяется без алгоритма обнаружения локального минимума. В этом случае РТП до цели не доходит, процесс прекращается при достижении предельного значения $N_{\text{iter}} = 300$.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) представлены результаты моделирования метода планирования с алгоритмом обнаружения локальных минимумов. В приведенных двух примерах достаточно двух итераций для выхода из локального минимума. На рис. 5 (см. третью сторону обложки) красными кружками, расположенными в малых окрестностях препятствий, показаны области локальных минимумов. Зелеными линиями представлены соответствующие сглаженные траектории, полученные после применения модифицированного метода потенциальных полей. В результате сглаживания для первого примера удается уменьшить параметр $\Delta\psi_s$ в (18) от значения 2,21 до значения 0,071, а для второго — от 2,37 до значения 0,063.

На рис. 6 (см. третью сторону обложки) приведены результаты моделирования для среды, в которой имеется несколько локальных минимумов.

В ходе исследования проведена серия из 200 экспериментов со случайной картой. Во всех случаях достигнута целевая точка, в 34 % примеров детектированы локальные минимумы с последующим их обходом по предложенной выше процедуре. При этом уменьшение параметра $\Delta\psi_s$ в результате применения процедуры сглаживания составляет от 19,4 до 59,2 раз.

Получено, что модифицированный метод потенциальных полей с алгоритмом детектирования и обхода локальных минимумов и двухэтапной процедурой сглаживания позволяет с небольшими вычислительными затратами и с малым набором обоснованно выбираемых параметров получить гладкую траекторию РТП. В отличие от метода случайной генерации направления движения из точки локального минимума, предложенного в работе [35], данный метод позволяет выводить робота из области циклических движений.

В отличие от метода неустойчивых режимов [11, 25], в котором за счет контролируемых бифуркаций в динамике робота обеспечивается выход из области локального минимума при

определенных массоинерционных и движительно-рулевых ограничениях, предлагаемый метод является кинематическим, работающим безотносительно к динамике объекта. Очевидно, что максимальный учет кинематических особенностей движения в отношении локализации минимумов потенциальных функций обеспечивает менее жесткие требования к конечной системе управления роботом.

Заключение

В настоящей работе предложено использовать модернизированный алгоритм потенциальных полей, позволяющий избегать локальных минимумов за счет детектирования явления "защелкивание вокруг точки". Алгоритм базируется на оптимизационной процедуре, в которой функционал качества включает отталкивающую и притягивающую составляющие, имеющие квадратичную форму. Параметры этих составляющих обосновываются в большей степени, чем в исходном методе потенциальных полей.

Для учета препятствий многоугольной формы предложен метод эффективной точки, являющейся эквивалентом таких препятствий по отношению к текущему положению движущейся РТП.

Для сглаживания траекторий предлагается двухступенчатая методика, включающая минимизацию полученной пространственной кусочно-линейной кривой по длине, последующее построение кусочно-квадратичной кривой и ее временную параметризацию. Процедура обеспечивает сглаживание траектории в окрестностях ее вершин, а также управление траекторной скоростью робота с учетом особенностей кинематики РТП на поворотах.

Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность процедуры нахождения локальных минимумов, а также их обход для сред с множеством минимумов. При этом вычислительная сложность предлагаемых алгоритмов не выше сложности алгоритмов, предложенных в работах [11, 25–27, 35].

В дальнейшем описанные алгоритмы планируется использовать в системе группового управления движением РТП. В таких системах особенно важно получение гладких физически реализуемых траекторий, поскольку отклонение от них может приводить к коллизиям.

Список литературы

1. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. Vol. 2. P. 100–107.
2. Пискорский Д. С., Абдуллин Ф. Х., Николаева А. Р. Оптимизация алгоритма планирования пути A-star // Вестник ЮУрГУ. Серия "Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника". 2020. Т. 20, № 1. С. 154–160.
3. Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments // In Intelligent Unmanned Ground Vehicles. Springer, Boston, MA, USA, 1997. P. 203–220.
4. Казаков К. А., Семенов В. А. Обзор современных методов планирования пути // ТРУДЫ ИСП РАН. 2016. Т. 28(4). С. 241–294.
5. LaValle S. M., Kuffner J. J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects // 2000 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. 2000. P. 293–308.
6. Ravankar A., Ravankar Ab., Emaru T., Kobayashi Y. HPPRM: Hybrid Potential Based Probabilistic Roadmap Algorithm for Improved Dynamic Path Planning of Mobile Robots // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 221743–221766.
7. Khatib O. Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // International Journal of Robotics Research. 1986. Vol. 5(1). P. 90–98.
8. Платонов А. К., Карпов И. И., Кирильченко А. А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы. М.: Препринт Института прикладной математики АН СССР, 1974. 27 с.
9. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциально-го наведения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 11. С. 677–685.
10. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Децентрализованное управление группой однородных подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5. С. 346–353.
11. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Труды СПИИРАН. 2018. Вып. 60. С. 39–63.
12. Medvedev M., Pshikhopov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions // Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering. 7–8 October 2021, Mauritius.
13. Гайдук А. Р., Мартьянов О. В., Медведев М. Ю., Пшихопов В. Х., Хамдан Н., Фархунд А. Нейросетевая система управления группой роботов в неопределенной двумерной среде // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 8. С. 470–479.
14. Nazarahari M., Khanmirza E., Doostie S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm // Expert Systems with Applications. 2019. Vol. 115. P. 106–120.
15. Hoy M., Matveev A. S., Savkin A. V. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments. A survey // Robotica. 2015. Vol. 33, N. 3. P. 463–497.
16. Shlyakhov N. E., Vatamaniuk I. V., Ronzhin A. L. Review of the Methods and Algorithms of a Robot Swarm Aggregation // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2017. Vol. 18, N. 1. P. 22–29.
17. Сухарев А. Г. Оптимальные стратегии поиска экстремума // СССР. Вычислительная математика и математическая физика. 1971. Т. 11(4). С. 910–924.
18. Hornung A., Wurm K. M., Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees // Autonomous Robots. 2013. Vol. 34(3). P. 189–206.

19. Janson L., Ichter B., Pavone M. Deterministic sampling-based motion planning: Optimality, complexity, and performance // International Journal of Robotics Research. 2018. Vol. 37, N. 1. P. 46–61.
20. Wang Q., Hao Y., Chen F. Deepening the IDA* algorithm for knowledge graph reasoning through neural network architecture // Neurocomputing. 2021. Vol. 429. P. 101–109.
21. Zhou R., Hansen E. A. Memory-Bounded {A*} Graph Search // The Florida AI Research Society Conference – FLAIRS. 2002. P. 203–209.
22. Holte R., Perez M., Zimmer R., MacDonald A. Hierarchical A*: Searching abstraction hierarchies efficiently // Proceedings of the 13th national conference on Artificial intelligence. 1996. Vol. 1. P. 530–535.
23. Liu B., Xiao X., Stone P. A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation // IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. Vol. 6, N. 2. P. 1090–1096.
24. Chen B. Y., Chen X.-W., Chen H.-P., Lam W. H. K. Efficient algorithm for finding k shortest paths based on re-optimization technique // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2020. Vol. 133, Article number 101819.
25. Pshikhov V. Kh. (Ed.), Beloglazov D., Finaev V., Guzik V., Kosenko E., Krukhmalev V., Medvedev M., Pereverzev V., Pyavchenko A., Saprykin R., Shapovalov I., Soloviev V. Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments. Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2017. 312 p.
26. Ge S. S., Cui Y. J. New potential functions for mobile robot path planning // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2000. Vol. 16, N. 5. P. 615–620.
27. Woods A. C., La H. M. A Novel Potential Field Controller for Use on Aerial Robots // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019. Vol. 49, N. 4. P. 665–676.
28. Медведев М. Ю., Костюков В. А., Пшихопов В. Х. Оптимизация движения мобильного робота на плоскости в поле конечного числа источников-репеллеров // Труды СПИИРАН. 2020. Т.19, № 1. С. 43–78.
29. Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhov V. Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field // Informatics and Automation. 2021. Vol. 20, N. 3. P. 690–726.
30. Wilkinson J. H. The algebraic Eigenvalue Problem. Oxford, Clarendon Press, 1965.
31. Гантмахер Ф. П. Теория матриц. М.: Наука, 1988.
32. Чекмарев А. А. Инженерная графика. М: Высшая школа, 1988.
33. Saproonov L., Lacaze A. Path planning for robotic vehicles using generalized Field D* // Proc. SPIE, Unmanned Systems Technology X. 2008.
34. Григорьев М. И., Малоземов В. Н., Сергеев А. Н. Полиномы Бернштейна и составные кривые Безье // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2006. Т. 46, № 11. С. 1962–1971.
35. Li F. Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach // Proc. Of the 2nd Intern. Conf. on Computer Science and Electronics Engineering. 2013. P. 1314–1317.

Algorithms for Planning Smoothed Individual Trajectories of Ground Robots

V. A. Kostjukov, wkost-einheit@yandex.ru, M. Y. Medvedev, medvmihal@sfnu.ru,

V. Kh. Pshikhov, pshichop@rambler.ru,

Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

Corresponding author: Kostjukov Vladimir A., Cand. of Tech. Sc., Senior Researcher, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation, e-mail: wkost-einheit@yandex.ru

Accepted on July 26, 2022

Abstract

The article is devoted to the development of an algorithm for constructing the trajectory of a robotic platform moving in an environment with obstacles. This algorithm is based on the application of a special local optimization procedure at each planning step and allows us to obtain feasible program trajectories without increasing the computational complexity of algorithms compared to existing methods. The algorithm is based on the application of the improved method of potential fields and subsequent smoothing of the resulting trajectory. The improving of the potential field method consists in a new way of detecting and avoiding local minima. When a local minimum is detected, it is added to the map as an additional obstacle, which makes it possible to avoid it during further trajectory planning. To circumvent obstacles that can be approximated by polygons, the method of the effective point to the obstacle is proposed, which is the equivalent of the latter in relation to the current location of the moving robotic platform when using this planning method. A two-stage technique for smoothing piecewise linear trajectories is proposed. It is assumed that there is some initial suboptimal curve found by any planning method. This curve is optimized using a functional that includes the length of the trajectory and the deviation of the optimized curve from the original curve. At the second stage, the linear segments of the planned straight line are conjugated with second-order curves. As a result, the planned trajectory of motion is a quadratic-linear curve with a smooth function of the trajectory velocity. At the same time, the proposed method of coupling rectilinear sections of the trajectory does not require sudden changes in speed when passing turns. Simulation results confirming the effectiveness of the proposed method of planning the trajectories of robots are considered and discussed.

Keywords: trajectory planning, smooth trajectories, local minima, robotic platform, two-dimensional environment

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-29-00370 performed at Joint-Stock Company "Robotics and Control Systems".

For citation:

Kostjukov V. A., Medvedev M. Y., Pshikhov V. Kh. Algorithms for Planning Smoothed Individual Trajectories of Ground Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 585–595.

DOI: 10.17587/mau.23.585-595

References

1. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, vol. 2, pp. 100–107.
2. Piskorskii D. S., Abdullin F. K., Nikolaeva A. R. Optimization of A-Star Search Algorithm, *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 154–160.
3. Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments, *In Intelligent Unmanned Ground Vehicles*, Springer, Boston, MA, USA, 1997, pp. 203–220.
4. Kazakov K. A., Semenov V. A. Reviews of modern path planning methods, *Proceedings of ISP RAS*, 2016, vol. 28(4), pp. 241–294 (in Russian)
5. LaValle S. M., Kuffner J. J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects, *2000 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 2000, pp. 293–308.
6. Ravankar A., Ravankar Ab., Emaru T., Kobayashi Y. HP-PRM: Hybrid Potential Based Probabilistic Roadmap Algorithm for Improved Dynamic Path Planning of Mobile Robots, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 221743–221766.
7. Khatib O. Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *International Journal of Robotics Research*, 1986, vol. 5(1), pp. 90–98.
8. Platonov A. K., Karpov I. I., Kiril'chenko A. A. Potential field attitude in the problem of path finding, Moscow. Institute of Applied Mathematics. Academy of Science USSR, 1974, 27 p. (in Russian).
9. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Issues of Motion Control of Mobile Robots Based on the Potential Guidance Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2019, vol. 20, no. 11, pp. 677–685 (in Russian).
10. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu. Decentralized Control of a Group of Similar Objects Moving in a Two-Dimensional Environment with Obstacles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no.5, pp. 346–353 (in Russian).
11. Pshikhopov V., Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes, *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 60, no. 5, pp. 39–63 (in Russian).
12. Medvedev M., Pshikhopov V., Gurenko B., Hamdan N. Path planning method for mobile robot with maneuver restrictions, *Proc. of the International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 7–8 October 2021, Mauritius.
13. Gaiduk A. R., Martjanov O. V., Medvedev M. Yu., Pshikhopov V. Kh., Hamdan N., Farhood A. Neural network based control system for robots group operating in 2nd uncertain environment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 8, pp. 470–479.
14. Nazarahari M., Khanmirza E., Doostie S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm, *Expert Systems with Applications*, 2019, vol. 115, pp. 106–120.
15. Hoy M., Matveev A. S., Savkin A. V. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments. A survey, *Robotica*, 2015, vol. 33, no. 3, pp. 463–497.
16. Shlyakhov N. E., Vatamaniuk I. V., Ronzhin A. L. Review of the Methods and Algorithms of a Robot Swarm Aggregation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 22–29.
17. Sukharev A. G. Optimal strategies of the search for an extremum, *U. S.S. R. Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1971, vol. 11, no. 4, pp. 910–924.
18. Hornung A., Wurm K. M., Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees, *Autonomous Robots*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 189–206.
19. Janson L., Ichter B., Pavone M. Deterministic sampling-based motion planning: Optimality, complexity, and performance, *International Journal of Robotics Research*, 2018, vol. 37, no. 1, pp. 46–61.
20. Wang Q., Hao Y., Chen F. Deepening the IDA* algorithm for knowledge graph reasoning through neural network architecture, *Neurocomputing*, 2021, vol. 429, pp. 101–109.
21. Zhou R., Hansen E. A. Memory-Bounded {A*} Graph Search, *The Florida AI Research Society Conference – FLAIRS*, 2002, pp. 203–209.
22. Holte R., Perez M., Zimmer R., MacDonald A. Hierarchical A*: Searching abstraction hierarchies efficiently, *Proceedings of the thirteenth national conference on Artificial intelligence*, 1996, vol. 1, pp. 530–535.
23. Liu B., Xiao X., Stone P. A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, vol. 6(2), pp. 1090–1096.
24. Chen B. Y., Chen X.-W., Chen H.-P., Lam W. H. K. Efficient algorithm for finding k shortest paths based on re-optimization technique, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, vol. 133, Article number 101819.
25. Pshikhopov V. Kh. (Ed.), Beloglazov D., Finaev V., Guzik V., Kosenko E., Krukhmalev V., Medvedev M., Pereverzev V., Pyavchenko A., Saprykin R., Shapovalov I., Soloviev V. *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*, Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2017, 312 p.
26. Ge S. S., Cui Y. J. New potential functions for mobile robot path planning, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, vol. 16, no. 5, pp. 615–620.
27. Woods A. C., La H. M. A Novel Potential Field Controller for Use on Aerial Robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, vol. 49, no. 4, pp. 665–676.
28. Medvedev M., Kostjukov V., Pshikhopov V. Optimization of mobile robot movement on a plane with finite number of repeller sources, *SPIIRAS Proceedings*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 43–78.
29. Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V. Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field, *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 3, pp. 690–726.
30. Wilkinson J. H. The algebraic Eigenvalue Problem, Oxford, Clarendon Press, 1965.
31. Gantmakher F. R. Theory of Matrices, Moscow, Nauka, 1988 (in Russian).
32. Checkmarev A. A. Engineering Graphics, Moscow, High School, 1988 (in Russian).
33. Saponov L., Lacaze A. Path planning for robotic vehicles using generalized Field D*, *Proc. SPIE 6962, Unmanned Systems Technology X*, 2008.
34. Grigor'ev M. I., Malozemov V. N., Sergeev A. N. Bernstein polynomials and composite Bezier curves, *Zh. Vychisl. Mat. Mat. Fiz.*, 2006, vol. 46, no. 11, pp. 1962–1971.
35. Li F. Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach, *Proc. Of the 2nd Intern. Conf. on Computer Science and Electronics Engineering*, 2013, pp. 1314–1317.

А. И. Машошин, д-р техн. наук, проф., aimashoshin@mail.ru,
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", г. Санкт-Петербург

Технологии искусственного интеллекта в задачах управления автономным необитаемым подводным аппаратом*

Целью работы является изложение опыта разработки с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ) алгоритмов, реализуемых в системе управления АНПА. Изложен взгляд автора на содержание понятия ИИ применительно к созданию сложных технических систем. Выделены две наиболее перспективные, по мнению автора, технологии ИИ: 1) разработка базового алгоритма и его совершенствование на основе результатов всестороннего моделирования в различных условиях эксплуатации; 2) создание проблемно-ориентированной искусственной нейронной сети и ее глубокое обучение с использованием большого количества экспериментально полученного обучающего материала. Констатируется, что обе технологии достаточно трудоемки и требуют продолжительного времени для реализации. Но если в технологии моделирования ключевую роль играет полнота и адекватность моделирования условий, в которых предполагается функционирование создаваемой системы, то в технологии машинного обучения на передний план выходит наличие достаточного количества обучающего материала (в случае разработки систем технического зрения — изображений распознаваемых объектов, число которых может исчисляться многими тысячами). В работе приведена структура мультиагентной системы управления АНПА, сделан акцент на сложности решаемых ею задач и необходимости применения при ее создании технологий ИИ. Показано, что из всех задач, решаемых системой управления АНПА, методы ИИ наиболее востребованы для решения двух категорий задач: 1) распознавания сложившейся на данный момент ситуации и принятия в этой ситуации адекватного решения в интересах выполнения маршрутного задания; 2) поиск назначенного донного объекта среди множества других донных объектов естественного и искусственного происхождения. Применение технологий ИИ продемонстрировано на примере разработки с использованием специально созданного стенда моделирования алгоритма управления АНПА при обходе протяженного препятствия. Предложено задачу обнаружения и распознавания назначенного донного объекта решать с применением технологии глубокого обучения проблемно-ориентированной искусственной нейронной сети с той особенностью, что обучающий материал формируется программным путем в виде цифровых изображений искомого донного объекта на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, искусственный интеллект, имитационное моделирование, искусственные нейронные сети, глубокое обучение

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана [1–3].

Наиболее актуально применение АНПА в районах, покрытых льдом, а также на больших глубинах, недоступных для подводных лодок.

Особое место среди АНПА занимают аппараты тяжелого класса, которые могут взять на себя многие функции, традиционно возлагающиеся на специализированные надводные суда, подводные лодки и обитаемые подводные аппараты [4]. К этим функциям относятся:

- поиск полезных ископаемых на морском шельфе;
- доставка грузов в труднодоступные районы;
- прокладка подводных линий связи;
- поиск затонувших кораблей и самолетов;

- экологический мониторинг Мирового океана;
- исследование морской флоры и фауны;
- проведение подводных археологических исследований;
- охрана территориальных вод от несанкционированного вторжения иностранных подводных объектов;
- поиск и уничтожение морских мин.

АНПА тяжелого класса могут эффективно использоваться также в военной сфере, поскольку их применение хорошо вписывается в концепцию сетецентрической войны на море, возобладавшую в мире в последние десятилетия [5–9].

При этом одним из ключевых вопросов создания АНПА является разработка эффективной системы управления, назначение которой — обеспечить максимально точное выполнение предварительно загруженного маршрутного задания, представляющего собой набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам [9].

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

Сложность создания эффективной системы управления АНПА состоит в том, что точное выполнение маршрутного задания затруднено по целому ряду причин — как внешних, так и внутренних. К внешним относятся:

— отклонение АНПА от заданного маршрута, обусловленное погрешностями навигации, необходимостью расхождения с обнаруженными подвижными подводными объектами и обхода неподвижных препятствий;

— непредвиденные изменения скорости и/или направления течения, влекущие за собой изменения параметров движения АНПА;

— изменение границ ледового покрова, что препятствует всплытию для обсервации в назначенное время.

Большинство из перечисленных факторов приводит к дополнительным временным и энергетическим затратам и, в конечном счете, к необходимости корректировки маршрутного задания. Ситуация еще более осложняется в условиях преднамеренного противодействия выполнению миссии, что имеет место при применении АНПА в специальных операциях.

Внутренними факторами являются неисправности аппаратной части АНПА и неустраняемые сбои программного обеспечения, что также приводит к необходимости корректировки маршрутного задания, а в ряде случаев и к прекращению миссии.

Перечисленные негативные факторы, а также необходимость учитывать объем запасов электроэнергии, ограничения по скорости хода, глубине погружения, точности автономной навигации, дальности гидроакустической связи существенно осложняют принятие системой управления эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии. По этой причине система управления АНПА должна обладать способностью реализовывать сложные трудно формализуемые адаптивные алгоритмы. Из этого следует вывод, что при создании систем управления АНПА нельзя обойтись без применения технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Целью работы является изложение опыта разработки алгоритмов, реализуемых в системе управления АНПА, с применением технологий ИИ.

Что такое искусственный интеллект и как его применять на практике

Словосочетание "ИИ" является одним из часто употребляемых в наше время. Однако

анализ публикаций показывает, что единства понимания, что такое ИИ и как его применять на практике, на сегодняшний день нет, в том числе и среди специалистов. Поэтому не будет лишним изложить взгляд разработчика систем управления АНПА на содержание ИИ применительно к его практическому использованию для создания сложных технических систем.

В мире развиваются два слабо связанных научных направления с одинаковым названием "ИИ". Первое из них, именуемое "сильным ИИ", ищет ответ на вопрос "Может ли машина мыслить?", который поставил в 1950 г. Алан Тьюринг, предложивший также тест (тест Тьюринга) для оценивания интеллекта машины [10, 11]. В этом направлении работают философы, психологи, нейрофизиологи, IT-специалисты.

Второе направление, называемое "слабым ИИ", рассматривает ИИ как набор технологий решения практических задач с использованием ЭВМ.

Термин "artificial intelligence (AI)" предложил в 1956 г. Джон МакКарти [12], основатель функционального программирования и разработчик алгоритмического языка символьных вычислений Lisp. При этом следует заметить, что МакКарти, предлагая термин AI, имел в виду не интеллект как способность мыслить (интеллект в английском языке определяется словом *intellect*), а способность получать полезную информацию (*intelligence* в английском языке используется в смысле получения необходимых данных, разведки). В результате некорректный перевод на русский язык термина AI привел к тому, что в русскоязычной литературе оба направления нередко трактуются как единое целое и, как следствие этого, под ИИ часто понимается создание программ для ЭВМ, имитирующих работу человеческого мозга, что сужает область применения ИИ. Далее будем вести речь только о втором направлении развития ИИ, т. е. о применении технологий ИИ для решения практических задач с использованием ЭВМ.

В СССР развитие ИИ началось в 60-х годах прошлого века [13]. Сначала исследования велись в рамках кибернетики. В конце 70-х годов ИИ был признан разделом вновь созданного научного направления информатики. Наиболее заметный вклад в развитие ИИ в СССР внесли Г. С. Поспелов, Д. А. Поспелов, С. Ю. Маслов.

Бум в развитии ИИ в мире наступил в последние десятилетия во многом благодаря рез-

кому росту характеристик ЭВМ и развитию метода глубокого обучения искусственных нейронных сетей [14, 15].

В России руководством страны утверждены Национальная стратегия развития ИИ и механизм ее реализации [16, 17]. Цель, поставленная в этих документах, — развитие отечественных технологий ИИ.

Международная конференция по ИИ Artificial Intelligence Journey вошла в топ международных научных конференций [18]. В 2020 г. в ней в online-режиме приняли участие более 20 тысяч ученых и специалистов со всего мира, в том числе Президент РФ В. В. Путин.

Применение ИИ в технике — это не что иное, как разработка алгоритмов решения с использованием ЭВМ сложных практических задач. Под сложностью задачи понимается многовариантность алгоритма ее решения и зависимость качества результата как от выбранного варианта, так и от некоторых изменяющихся внешних условий.

Попросту говоря, ИИ необходим в тех случаях, когда теоретически разработать эффективный (!) алгоритм решения задачи затруднительно. Наглядным примером этого является история разработки в разных странах мира программы для игры в шахматы. В 70-х годах прошлого века в СССР она создавалась коллективом высококвалифицированных специалистов под руководством экс-чемпиона мира, доктора технических наук М. М. Ботвинника. Однако несмотря на все усилия долгое время разрабатываемая программа проигрывала даже средним игрокам. И только в 1997 г. созданный в США с применением технологий ИИ шахматный процессор Deep Blue позволил со счетом 3,5:2,5 обыграть чемпиона мира Г. К. Каспарова [19].

ИИ дает положительный эффект в тех случаях, когда преимущества ЭВМ по быстродействию и объему памяти оказываются более важными, чем опыт, логика и интуиция человека.

Сегодня ИИ применяется для решения практических задач во многих областях человеческой деятельности. ИИ крайне востребован в военной сфере, поскольку наиболее сложные задачи, требующие применения ИИ, возникают при противоборстве с разумным противником.

Понятие ИИ тесно связано с понятием "робот". Под роботом понимается техническая система, как правило, перемещающаяся в про-

странстве, способная самостоятельно распознать сложившуюся ситуацию и находить рациональное целенаправленное поведение в этой ситуации. Заметим, что под данное определение робота не подпадают безэкипажные технические системы, управляемые оператором по каналам связи.

Таким образом, ИИ — набор технологий решения сложных практических задач. Результатом применения ИИ является алгоритм решения задачи, реализованный в виде программы для ЭВМ.

В литературе описан широкий набор технологий ИИ, но среди них по продуктивности выделяются две — моделирование и машинное обучение.

Моделирование заключается в разработке специалистами в конкретной предметной области базовой версии алгоритма решения задачи и ее последующая доработка посредством всестороннего имитационного моделирования. Эта технология применяется, в первую очередь, для решения задач управления техническими системами в сложной обстановке. С использованием этой технологии была создана программа для игры в шахматы Deep Blue.

Машинное обучение позволяет выявлять закономерности в обучающем материале. На сегодняшний день из всех разновидностей машинного обучения на передний план выдвинулось глубокое обучение искусственных нейронных сетей (ИНС) [14, 15]. Для применения этой технологии специалисты в конкретной предметной области должны спроектировать (или выбрать готовую) ИНС, ориентированную на решение конкретной задачи, и провести ее глубокое обучение с использованием большого количества обучающего материала. Данная технология, в первую очередь, применяется в системах технического зрения для распознавания образов, например, лиц в толпе, наземных объектов по снимкам из космоса либо с самолета. Однако делаются попытки применять ее и в других областях и, более того, провозгласить ее основной технологией ИИ.

Обе описанные технологии достаточно трудоемки и требуют продолжительного времени для реализации. Но если в технологии моделирования ключевую роль играет полнота и адекватность моделирования условий, в которых предполагается функционирование создаваемой системы, то в технологии машинного обучения на передний план выходит наличие до-

статочного количества обучающего материала (в случае разработки систем технического зрения число изображений распознаваемых объектов может исчисляться многими тысячами).

Еще очень важен следующий момент. Алгоритмы решения практических задач, полученные путем машинного обучения, формируются автоматически и без возможности их корректировки (улучшения). В результате все пробелы в обучающем материале сказываются на их эффективности. При использовании технологии моделирования доводка алгоритмов до требуемого качества осуществляется осмысленно специалистами в соответствующей предметной области на основе анализа недостатков, выявленных в процессе моделирования. Из этого следует вывод, что при создании критических систем, от которых требуется высокая эффективность функционирования в любых условиях, целесообразно базироваться на технологии моделирования.

Объединяет обе рассмотренные технологии то, что специалист сначала должен разработать некий прообраз будущего алгоритма решения задачи, а затем, путем отработки на основе моделирования либо глубокого обучения, довести его до состояния, когда он будет обеспечивать требуемую эффективность.

Структура системы управления АНПА

Подходам к созданию системы управления АНПА как в России, так и за рубежом посвящено большое число публикаций, которое постоянно растет. Известно [20, 21], что построить централизованную (мульти-объектную) систему управления всеми радиоэлектронными и техническими средствами АНПА весьма затруднительно. Особенно это касается АНПА тяжелого класса, которые предназначены для работы на значительных расстояниях от базы и в широком диапазоне глубин и оборудованы широким набором радиоэлектронной аппаратуры и технических средств. Для таких АНПА наилучшим образом подходит система управления с мультиагентной структурой [22, 23].

Мультиагентная структура управления (рис. 1) предполагает, что каждая система АНПА является самостоятель-

ным интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Чтобы обеспечить слаженное взаимодействие агентов, предусмотрен специальный агент-диспетчер, называемый программным комплексом управления (ПКУ) [23], который должен своевременно посылать задания (команды) системам АНПА (точнее их системам управления). Для выполнения поступившей команды система АНПА может привлекать другие системы либо запрашивать у них данные.

Далее с учетом результатов выполнения отданных команд диспетчер формирует новые. Если в процессе осуществления миссии выясняется, что в силу возникших обстоятельств в точности выполнить маршрутное задание не представляется возможным, диспетчер корректирует его.

В силу децентрализации системы управления АНПА упрощаются алгоритмы, реализуемые диспетчером, и существенно сокращается объем данных, циркулирующих между диспетчером и системами АНПА.

На рис. 1 приведена структурная схема мультиагентной системы управления АНПА тяжелого класса, включающая, кроме диспетчера, четыре радиоэлектронные системы (навигации, освещения обстановки, радиосвязи и позиционирования, гидроакустической связи и позиционирования), а также четыре технические системы (генерации и распределения электроэнергии, движительно-рулевого, дифферентовки, аварийной сигнализации). В качестве диспетчера технических систем выступает система управления техническими средствами, куда передаются все сложные алгоритмы управле-



Рис. 1. Структурная схема мультиагентной системы управления АНПА
Fig. 1. The structure of the AUV multiagent control system

ния, что позволяет еще более упростить работу центрального диспетчера. При необходимости перечень систем АНПА может быть расширен, например, за счет систем сменной нагрузки.

Обмен данными в системе управления АНПА осуществляется по сети, что позволяет каждой системе иметь доступ ко всем данным.

Применение технологий искусственного интеллекта для создания системы управления АНПА

Из всех задач, решаемых системой управления АНПА, выделяются две задачи, требующие применения технологий ИИ:

1) разработка алгоритмов управления АНПА, обеспечивающих выполнение маршрутного задания на миссию в условиях сложившейся обстановки;

2) поиск и распознавание назначенного донного объекта среди множества других донных объектов естественного и искусственного происхождения.

Технология разработки алгоритмов управления АНПА, обеспечивающих выполнение маршрутного задания на миссию

Для решения этой задачи была выбрана технология моделирования по следующим причинам:

— поскольку от качества управления АНПА зависит как его безопасность, так и безопасность других обитателей океана естественного и искусственного происхождения, к системе управления АНПА предъявляются высокие требования;

— ситуации, возникающие в процессе миссии АНПА, складываются в результате воздействия комплекса внешних и внутренних факторов, при этом весь перечень возможных ситуаций предсказать затруднительно;

— получить достаточный объем обучающего материала для применения технологии глубокого обучения ИНС, особенно на стадии проектирования АНПА, не представляется возможным.

С учетом этих обстоятельств был создан специальный стенд моделирования на базе высокопроизводительного сервера с развитой системой отображения, состоящий из двух частей:

1) цифрового двойника системы управления АНПА, имеющего структуру, изображенную

на рис. 1, но вместо реальных систем АНПА использующего их программные (цифровые) модели;

2) цифрового полигона, представляющего собой набор программных имитаторов, позволяющих максимально полно и адекватно имитировать:

— географические и гидроакустические условия в районе миссии АНПА;

— навигационно-гидрографические средства, установленные в районе (сигналы спутниковой и радионавигационной систем, сигналы донных маяков-ответчиков, пассивные подводные ориентиры);

— подвижные подводные и надводные объекты;

— неподвижные препятствия (береговую черту, подводные горы);

— сигналы на выходе приемных гидроакустических антенн системы освещения обстановки;

— сигналы на выходе навигационных датчиков измерения курса, скорости, глубины АНПА и глубины под килем;

— сигналы систем радио- и гидроакустической связи;

— динамику расхода запаса электроэнергии;

— динамику выхода из строя технических средств АНПА.

Рассмотрим задачу управления АНПА при обходе неподвижного препятствия, которую удалось решить путем моделирования с использованием разработанного стенда.

В качестве неподвижных препятствий могут выступать [24]:

— при плавании АНПА вдоль береговой черты — берег;

— при плавании в непосредственной близости от дна — неровности морского дна и затонувшие корабли;

— при плавании подо льдом — неровности нижней кромки льда;

— при плавании в высоких широтах — айсберги;

— при плавании в океанах — мусорные острова;

— при всплытии АНПА на поверхность — надводные корабли и суда, в том числе лежащие в дрейфе.

В известных публикациях [1, 25–28] данная задача рассматривается применительно к АНПА легкого класса, оснащенным высокочастотными впередсмотрящими гидролокато-

рами с узкими секторами обзора и с дальностью обнаружения препятствий не более 100 м. Наличие гидролокаторов указанного типа предполагает обход неподвижного препятствия путем огибания на небольшом расстоянии каждой неровности (рис. 2, а). В связи с этим основной проблемой, решаемой системой управления, является выбор скорости АНПА, при которой радиус его циркуляции позволит безопасно совершить маневр огибания очередной неровности. Ввиду этого время обхода неподвижного препятствия и, соответственно, энергетические затраты на эту операцию велики.

Для АНПА тяжелого класса, оборудованных мощной энергетической системой, развитыми средствами навигации и освещения подводной обстановки [4], появилась возможность решать рассматриваемую задачу путем заблаговременного обнаружения препятствия и безопасного его обхода на большой скорости, т. е. за минимальное время (рис. 2, б).

Путем моделирования различных вариантов решения данной задачи был выбран наиболее эффективный вариант, состоящий в следующем [29]. В процессе плавания система управления АНПА с использованием гидролокатора контролирует наличие препятствий во всем секторе обзора гидролокатора. При обнаружении препятствия гидролокатор определяет сектор курсовых углов, в котором наблюдается препятствие. Если этот сектор соизмерим с шириной характеристики направленности антенны, система управления принимает решение об обнаружении точечного объекта (подвижного либо неподвижного) и организует расхождение с ним по правилам кораблевождения. При наблюдении препятствия в широком секторе курсовых углов препятствие признается протяженным.

Обход протяженного препятствия начинается с попытки преодолеть его путем изменения глубины [1]. Для этого при плавании подо льдом либо в районах, в которых высока вероятность наличия мусорных островов, АНПА, не изменяя курса, погружается на допустимую глубину (рис. 3, а), а в остальных районах всплывает на допустимую глубину (рис. 3, б). Если в процессе изменения глубины препятствие перестает наблюдаться, АНПА

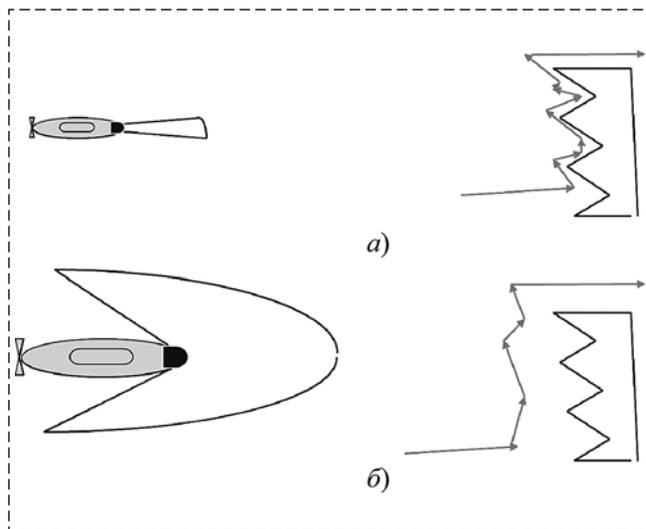


Рис. 2. Схема обхода препятствия:
а — АНПА легкого класса; б — АНПА тяжелого класса
Fig. 2. The scheme of obstacle avoidance:
а — by light AUV; б — by heavy AUV

прекращает дальнейшее изменение глубины и продолжает движение прежним курсом.

Если маневрирование по глубине не привело к желаемому результату (например, в том случае, когда препятствие оказалось береговой чертой), АНПА приступает к обходу препятствия по горизонтали. Для этого, в первую очередь, определяется пространственная ориентация лицевой части препятствия. Это достигается измерением гидролокатором дистанции до препятствия на крайних курсовых углах сектора курсовых углов, в котором наблюдается препятствие (рис. 4, а). Затем в предположении, что лицевая часть препятствия представляет собой вертикально стоящую плоскость, рассчитывается пеленг Pel_{obst} линии пересечения этой плоскости с дном:

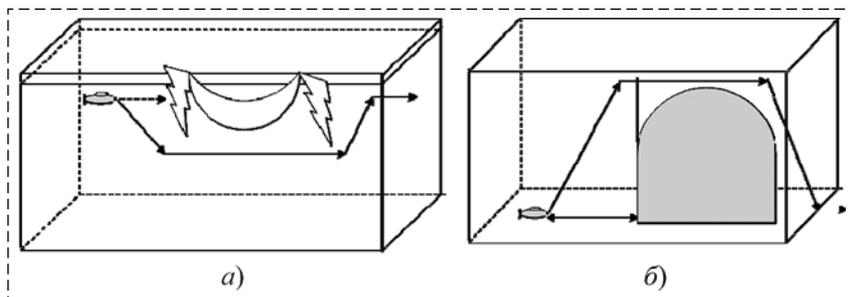


Рис. 3. Схема обхода протяженного препятствия путем изменения глубины:
а — при плавании подо льдом и в районах мусорных островов; б — в остальных районах
Fig. 3. The scheme of obstacle avoidance by depth changing:
а — when sailing under the ice; б — in regions of garbage islands

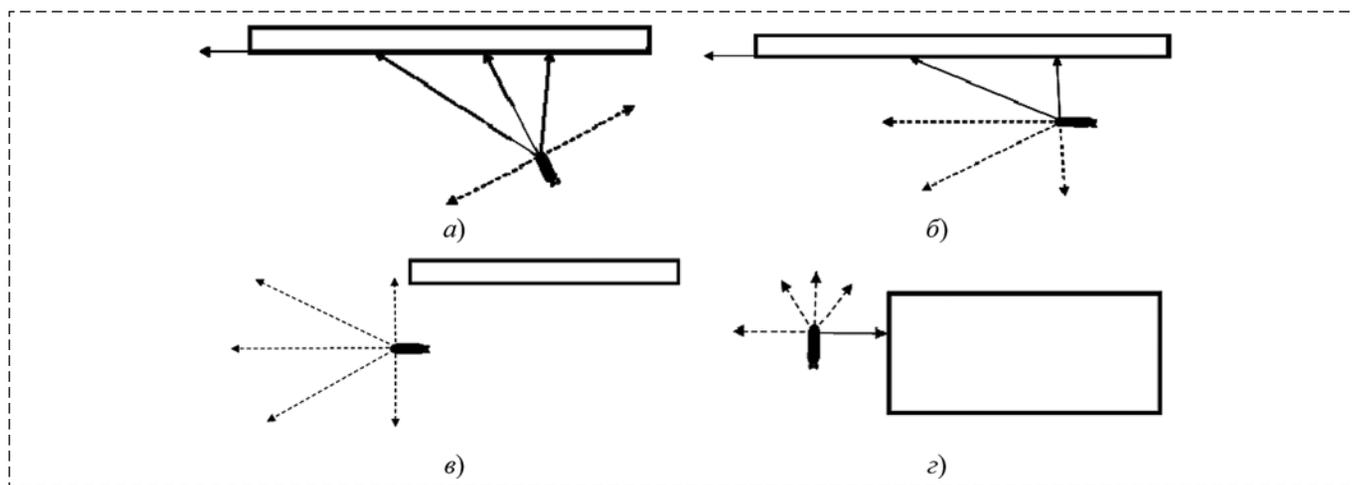


Рис. 4. Схема обхода протяженного препятствия без изменения глубины плавания

Fig. 4. The scheme of obstacle avoidance not changing the depth

$$Pel_{obst} = P_{left} - \arcsin \frac{R_{right} \sin[2(P_{right} - P_{left})]}{\sqrt{R_{left}^2 + R_{right}^2 - 2R_{left}R_{right} \cos[2(P_{right} - P_{left})]}}, \quad (1)$$

где P_{left} , P_{right} — пеленги, соответствующие крайнему левому и крайнему правому курсовым углам; R_{left} , R_{right} — дистанции, соответствующие пеленгам P_{left} , P_{right} .

Определив пространственную ориентацию препятствия, система управления АНПА выбирает направление движения вдоль линии Pel_{obst} , которое ближе к генеральному курсу АНПА, и ложится на курс обхода препятствия (рис. 4, б).

Поскольку на практике лицевая сторона препятствия не является плоскостью, система управления во время движения вдоль препятствия по данным гидролокатора по формуле (1) периодически уточняет ориентацию препятствия и корректирует курс АНПА так, чтобы расстояние от АНПА до препятствия не было меньше величины, содержащейся в базе данных системы управления.

Движение вдоль препятствия осуществляется до тех пор, пока препятствие не перестает наблюдаться гидролокатором (рис. 4, в). После этого АНПА прежним курсом должен пройти некоторую заданную дистанцию, а затем лечь на курс движения в целевую точку (рис. 4, г).

Технология решения задачи поиска и распознавание назначенного донного объекта

Задача поиска донных объектов возникает:

— при поиске затонувших кораблей, подводных лодок, самолетов и других объектов, оказавшихся на дне;

— при поиске и нейтрализации донных мин;
— при инспекции подводных сооружений, добывающих платформ, подводных трубопроводов и кабелей.

Сложность решения этой задачи состоит в том, что поиск назначенного объекта осуществляется путем его выявления (распознавания, идентификации) среди множества донных объектов естественного и искусственного происхождения. При этом для решения задачи используются средства мониторинга дна, работающие на разных физических принципах: многолучевых эхолоты, гидролокаторы бокового обзора (рис. 5), профилографы, электромагнитные искатели, телекамеры.



Рис. 5. Работа гидролокатора бокового обзора, установленного на АНПА

Fig. 5. A work of a side-view sonar, embedding on AUV

Однако каждое из этих средств имеет как достоинства, так и ограничения. В частности:

— многолучевой эхолот позволяет просматривать достаточно широкую полосу (до 200 м), но имеет низкую разрешающую способность, как правило, не позволяющую достоверно идентифицировать обнаруженный объект;

— гидролокатор бокового обзора имеет более высокую разрешающую способность, но более узкую полосу просмотра. К тому же он, как и многолучевой эхолот, не позволяет обнаруживать объекты под слоем ила;

— профилограф позволяет обнаруживать объекты под слоем ила, но имеет недостаточные разрешающую способность и полосу об следования;

— электромагнитные средства позволяют обнаруживать объекты с большой массой металла, но не позволяют идентифицировать их;

— оптические средства обладают высоким разрешением, потенциально достаточным для идентификации объекта, но требуют приближения к объекту на расстояние в несколько метров и наличия подсветки. Кроме того, они бесполезны, если объект поиска находится под слоем ила.

Поскольку поиск донных объектов является одной из основных задач, возлагаемых на АНПА, ее исследованию посвящено большое число публикаций в мировой научно-технической литературе. Однако в доступных источниках поиск донных объектов рассматривается применительно к использованию конкретного средства мониторинга дна, хотя выше было отмечено, что каждое средство имеет свои ограничения и, как правило, самостоятельно не позволяет эффективно решить рассматриваемую задачу.

Из этого следует естественный вывод, что эффективное решение рассматриваемой задачи возможно только при комплексном использовании средств мониторинга дна, работающих на разных физических принципах, при условии решения ряда научных проблем. В частности необходимо:

— определить оптимальную совокупность средств мониторинга дна для поиска различных объектов и обосновать их оптимальные технические характеристики и условия применения;

— разработать стратегию и алгоритмы управления АНПА при поиске назначенных донных объектов при комплексном использовании средств

мониторинга дна, работающих на разных физических принципах;

— с использованием технологий ИИ разработать алгоритмы распознавания (идентификации) обнаруженных объектов путем совместной обработки данных, полученных различными средствами мониторинга дна.

На последней проблеме стоит остановиться особо. При разработке алгоритмов распознавания донных объектов не представляется возможным воспользоваться наработками, полученными при решении задач распознавания образов в надводной и наземной среде. В частности, нельзя получить достаточный банк экспериментально полученных изображений для разработки алгоритмов распознавания методом глубокого обучения искусственных нейронных сетей [14, 15]. Вместо этого в доступной литературе предлагается большое число эвристических методов. В работе [30] приведен обзор этих методов и одновременно предложена методика распознавания донных объектов путем выявления на снимках, полученных с помощью видеокамеры, характерных точек объекта, выбранных человеком путем анализа чертежа объекта. Однако натурные эксперименты, проведенные авторами работы [30], показали, что в реальных условиях большая часть назначенных характерных точек не обнаруживается, ввиду чего распознавание осуществляется с недостаточно высокой достоверностью.

В результате выполненного анализа различных подходов к решению рассматриваемой задачи был сделан вывод, что наиболее перспективным путем решения задачи распознавания донных объектов все-таки является метод глубокого обучения искусственных нейронных сетей, но, учитывая специфику предметной области, обучение сети следует вести с использованием вместо изображений, полученных экспериментальным путем в реальных условиях, изображений, полученных на моделях объектов. Для этого необходимо научиться

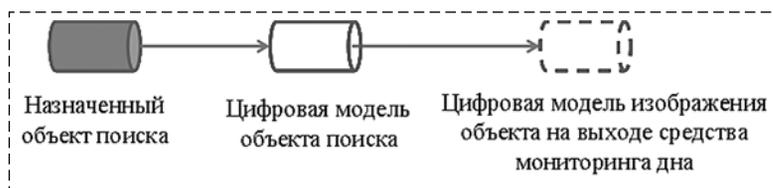


Рис. 6. Структура алгоритма формирования материала для глубокого обучения искусственной нейронной сети

Fig. 6. Structure of the algorithm for the formation of material for deep learning of an artificial neural network

оперативно создавать цифровые модели назначенных донных объектов, программным путем преобразовывать их в их цифровые изображения на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения, а затем использовать эти цифровые изображения для глубокого обучения проблемно ориентированной искусственной нейронной сети (рис. 6).

Предварительные результаты такого подхода изложены в работе [31].

Заключение

АНПА являются перспективным средством изучения и освоения Мирового океана. Если говорить об АНПА тяжелого класса, то на них возлагаются практически те же задачи, которые решают обитаемые подводные аппараты. Ввиду этого система управления АНПА не должна уступать системе управления обитаемых подводных аппаратов. Из этого следует вывод, что при создании системы управления АНПА нельзя обойтись без применения технологий ИИ. В частности:

— для разработки алгоритмов распознавания сложившейся на данный момент ситуации и принятия в этой ситуации адекватного решения в интересах выполнения маршрутного задания на миссию в наилучшей степени подходит технология имитационного моделирования. Данный подход проиллюстрирован в работе на примере разработки алгоритма управления АНПА при обходе протяженного препятствия;

— для разработки алгоритмов поиска и распознавания назначенных донных объектов конструктивным видится применение технологии глубокого обучения проблемно-ориентированной искусственной нейронной сети с той особенностью, что обучающий материал формируется программным путем в виде цифровых изображений искомого донного объекта на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения.

Список литературы

1. Инзарцев А. В., Киселев Л. В., Костенко В. В., Матвиенко Ю. В., Павин А. М., Шербатюк А. Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с.

2. Инзарцев А. В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 5—14.

3. Millar G., Mackay L. Maneuvering Under the Ice // Sea Technology. 2015. Vol. 56, N. 4. P. 35—38.

4. Аполлонов Е. М., Бачурин А. А., Горохов А. И., Пonomарев Л. О. О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сб. Матер. XIII Всеросс. науч.-практ. Конф. "Перспективные системы и задачи управления". Ростов-на-Дону — Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 34—42.

5. Jane's unmanned maritime vehicle. 2019-2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK, 2020.

6. Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Бочаров Л. Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП "Хабаровская краевая типография", 2011. 304 с.

7. Кузьмицкий М. А., Гизитдинова М. Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, № 3. С. 37—48.

8. Cebrowski A. K., Garstka J. J. Network-centric warfare: its origins and future // U. S. Naval Institute Proceedings. 1998. N. 1.

9. Баулин В., Кондратьев А. Реализация концепции "сетецентрическая война" в ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 6. С. 61—67.

10. Тьюринг А. Могут ли машины мыслить? М.: Госиздательство физ.-мат. литературы, 1960.

11. Turing A. Computing Machinery and Intelligence // Mind. 1950. V. LIX, N. 236. P. 433—460.

12. What is Artificial Intelligence? URL: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html>.

13. Искусственный интеллект в СССР. URL: http://ai-news.ru/2017/10/iskusstvennyj_intellekt_v_ssr.html.

14. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2017. 652 с.

15. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.

16. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. Утверждена указом Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490.

17. Концепции развития регулирования отношений в сфере технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 19 августа 2020 г. № 2129-р.

18. Artificial Intelligence Journey. URL: <https://ai-journey.ru>

19. Newborn M. Deep Blue: An artificial intelligence milestone. Springer, 2003. 346 p.

20. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64—116.

21. Ржевский Г. А., Скобелев П. О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.

22. Innocenti V. A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.

23. Борейко А. А., Инзарцев А. В., Машошин А. И., Павин А. М., Пашкевич И. В. Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (28). С. 23—31.

24. Лаптев К. З., Илларионов Г. Ю. Что может помешать подводному мореходству автономного необитаемого подводного аппарата // Сб. Матер. XIII Всеросс. науч.-практ. Конф. "Перспективные системы и задачи управления". Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2017. С. 138—146.

25. Инзарцев А. В., Багницкий А. В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Шестая Всерос. науч.- техн. конф. "Технические проблемы освоения мирового океана" (ТПОМО-6). Владивосток, 2015. С. 450—454.

26. Тусеева И. Б., Тусеева Д. Б., Ким Юн-Ги. Алгоритм динамического окна для навигации автономных подводных аппаратов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 3. С. 67—77.

27. Galarza C., Masmitja I., Prat J., Gomariz S. Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 32—37.

28. Lin C., Wang, H., Yuan J., Yu D., Li C. An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance // IEEEJ.Ocean. Eng. 2019. Vol. 44. P. 120—133.

29. Быкова В. С., Машошин А. И., Пашкевич И. В. Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29, № 1 (112). С. 97—110.

30. Инзарцев А. В., Панин М. А., Бобков В. А., Морозов М. А. Модельное решение задачи инспекции объектов промышленного оборудования с помощью АНПА на базе методики видеораспознавания характерных точек // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3 (37). С.23—35.

31. Быкова В. С., Машошин А. И., Смирнов А. С. Об одном подходе к распознаванию донных объектов с использованием средств мониторинга дна, установленных на автономном необитаемом подводном аппарате // Труды конференции "Автоматизация-2022" (в печати).

Artificial Intelligence Technologies in the Autonomous Underwater Vehicle Control Systems

A. I. Mashoshin, aimashoshin@mail.ru,

JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, 197046, Russian Federation

Corresponding author: **Mashoshin A. I.**, Dr. Tech. Sc., Chief of Research Center,
JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, 197046, Russian Federation,
e-mail: aimashoshin@mail.ru

Accepted on August 5, 2022

Abstract

The purpose of the paper is to present the experience of developing algorithms implemented in the AUV control system using artificial intelligence (AI) technologies. The author's view on the content of the concept of AI in relation to the creation of complex technical systems is presented. Two of the most promising, according to the author, AI technologies are identified: 1) development of the basic algorithm and its improvement based on the results of comprehensive modeling in various operating conditions; 2) creation of a problem-oriented artificial neural network and its deep learning using a large amount of experimentally obtained training material. It is stated that both technologies are quite time-consuming and require a long time to implement. But if the completeness and adequacy of modeling of the conditions in which the system being created is supposed to function plays a key role in modeling technology, then in machine learning technology, the availability of a sufficient amount of training material comes to the fore (in the case of developing vision systems — images of recognizable objects, the number of which can number many thousands). The paper presents the structure of the multi-agent control system of AUV, focuses on the complexity of the tasks it solves and the need to use AI technologies in its creation. It is shown that of all the tasks solved by the AUV control system, AI methods are most in demand for solving two categories of tasks: 1) recognition of the current situation and making an adequate decision in this situation in the interests of completing the route task; 2) search for the designated bottom object among many other bottom objects of natural and artificial origin. The use of AI technologies is demonstrated by the example of the development using a specially created simulation stand of the AUV control algorithm when bypassing an extended. It is proposed to solve the problem of detecting and recognizing a designated bottom object using deep learning technology of a problem-oriented artificial neural network with the peculiarity that the training material is formed programmatically in the form of digital images of the desired bottom object at the output of hydroacoustic, optical and electromagnetic means of monitoring the bottom in various conditions of their observation.

Keywords: autonomous underwater vehicle, artificial intelligence, simulation, artificial neural networks, deep learning

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project 22-29-00320).

For citation:

Mashoshin A. I. Artificial Intelligence Technologies in the Autonomous Underwater Vehicle Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 596—606.

DOI: 10.17587/mau.23.596-606

References

1. Inzartsev A. V., Kiselev L. V., Kostenko V. V., Matvienko Yu. V., Pa-vin A. M., Shcherbatyuk A. F. Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications, Vladivostok, Dalnauka, 2018, 368 p. (in Russian).

2. Inzartsev A. V. et al. Application of an autonomous uninhabited underwater vehicle for scientific research in the Arctic, *Underwater research and robotics*, 2007, no. 2(4), pp. 5—14 (in Russian).

3. Millar G., Mackay L., Maneuvering Under the Ice, *Sea Technology*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 35—38.

4. **Apollonov E. M., Bachurin A. A., Gorokhov I., Ponomarev L. O.** On the possibility and necessity of creating an ultra-large uninhabited underwater vehicle, *Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks"*, Rostov-on-Don — Taganrog, SFU, 2018, pp. 34–42 (in Russian).
5. **Wong K. ed.** Jane's unmanned maritime vehicle, 2019–2020, IHS Markit, Coulsdon, Surrey, UK, 2020.
6. **Illarionov G. Yu., Sidenko K. S., Bocharov L. Yu.** Threat from the depths: XXI century, Khabarovsk, KGUP "Khabarovsk Regional Printing House", 2011, 304 p. (in Russian).
7. **Kuzmitsky M. A., Gizitdinova M. R.** Mobile underwater robots in solving Navy tasks: Modern technologies and prospects, *Fundamental and applied hydrophysics*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 37–48 (in Russian).
8. **Cebrowski A. K., Garstka J. J.** Network-centric warfare: its origins and future, *U. S. Naval Institute Proceedings*, 1998, no. 1.
9. **Baulin V., Kondratiev A.** Implementation of the concept of "network-centric war" in the US Navy, *Foreign Military Review*, 2009, no. 6, pp. 61–67 (in Russian).
10. **Turing A.** Can machines think? Moscow State publishing of physics.-mat. literature, 1960 (in Russian).
11. **Turing A.** Computing Machinery and Intelligence, *Mind*, 1950, V. LIX, no. 236. pp. 433–460.
12. **What is Artificial Intelligence?**, available at: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html>.
13. **Artificial intelligence in the USSR**, available at: http://ai-news.ru/2017/10/iskusstvennyj_intellekt_v_ssr.html (in Russian).
14. **Goodfellow Ya., Benjio I., Courville A.** Deep learning, Moscow, DMK Press, 2017, 652 p. (in Russian).
15. **Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E.** Deep learning, St. Petersburg, Peter, 2018, 480 p. (in Russian).
16. **National strategy for the development of artificial intelligence for the period up to 2030.** Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 490, 17 dated October 10, 2019 (in Russian).
17. **The concept of development of regulation of relations in the field of artificial intelligence and robotics technologies until 2024.** Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated August 19, 2020, No. 2129-p. (in Russian).
18. **Artificial Intelligence Journey**, available at: [https:// ai-journey.ru](https://ai-journey.ru)
19. **Newborn M.** Deep Blue: An artificial intelligence milestone, Springer, 2003, 346 p.
20. **Gorodetsky V. I., Grushin M. S., Khabalov A. V.** Multi-agent system (review), *News of artificial intelligence*, 1998, no. 2, pp. 64–116 (in Russian).
21. **Rzhevsky G. A., Skobelev P. O.** How to manage complex systems? Multi-agent technologies for the creation of intelligent enterprise management systems, Samara, Etching, 2015, 290 p. (in Russian).
22. **Innocenti B.** A multi-agent distributed coordination with architecture for an Autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.
23. **Boreyko A. A., Inzartsev A. V., Mashoshin A. I., Pavin A. M., Pashkevich I. V.** Control system of large-scale autonomous autonomous vehicle based on a multi-agent approach, *Underwater research and robotics*, 2019, no. 2 (28), pp. 23–31 (in Russian).
24. **Lapteva K. Z., Illarionov G. Yu.** What can hinder the underwater navigation of an autonomous uninhabited underwater vehicle, *Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks"*, Rostov-on-Don, Southern Federal University, 2017, pp. 138–146 (in Russian).
25. **Inzartsev A. V., Bagnitsky A. V.** Algorithms for circumventing local bottom objects for an autonomous underwater robot, *Sixth All-Russian Scientific.-tech. conf. "Technical problems of the development of the world ocean" (TPOMO-6)*, Vladivostok, 2015, pp. 450–454 (in Russian).
26. **Tuseeva I. B., Tuseeva D. B., Kim Yun-gi.** Dynamic window algorithm for navigation of autonomous underwater vehicles, *Artificial intelligence and decision-making*, 2013, no. 3, pp. 67–77 (in Russian).
27. **Galarza C., Masmitja I., Prat J., Gomariz S.** Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV, *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, pp. 32–37.
28. **Lin C., Wang H., Yuan J., Yu D., Li C.** An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2019, vol. 44, pp. 120–133.
29. **Bykova V. S., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V.** Safe Navigation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles, *Gyroscopy and Navigation*, 2021, vol.12, no.1, pp. 86–95 (in Russian).
30. **Inzartsev A. V., Panin M. A., Bobkov V. A., Morozov M. A.** Model solution of the problem of inspection of industrial equipment facilities with the help of ANPA based on the method of video recognition of characteristic points, *Underwater research and robotics*, 2021, no. 3 (37), pp. 23–35 (in Russian).
31. **Bykova V. S., Mashoshin A. I., Smirnov A. S.** One approach to the recognition of bottom objects using monitoring systems installed on an autonomous underwater vehicle, *Proc. RusAutoCon-2022* (in press).

А. Ахмад, аспирант, aws.ahmad318@gmail.com, **Я. Вассуф**, аспирант, thelegend990@gmail.com,
К. В. Коновалов, аспирант, bmstu.konovlov2011@yandex.ru,
А. С. Юценко, д-р техн. наук, проф., arkadyus@mail.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Исследование подводного робота с волнообразным движителем

Статья посвящена анализу механизма волнообразного движения подводных роботов. Приводится краткий обзор исследований, связанных с разработкой математической модели движения подводного робота с использованием волнообразного движителя в рабочем пространстве. Эта математическая модель имитирует движение некоторых видов рыб, например, скатов-батоидов (batooids). Целью исследования было обоснование возможности создания движительного механизма робота, в котором волнообразное движение плавника обеспечивается колебательными движениями отдельных элементов, реализуемых серводвигателями. При соответствующем управлении эти движения обеспечивают маневренность аппарата по сравнению с существующими моделями. Кроме того, движение становится практически бесшумным. Приводятся результаты предварительных экспериментов, выполненных на макете робота в целях проверки основных режимов движения. Эксперименты подтвердили возможность реализации предложенного способа управления. Определены параметры модели, обеспечивающие устойчивое движение подводного робота.

Ключевые слова: волнообразное движение, плавник, сила тяги, кинематическая схема, гидромеханический анализ, дифференциальная модель, походный режим

Введение

Сегодня роботы проникли во все сферы деятельности человека (в промышленность, сельское хозяйство, медицину, военную сферу). В связи с этим возросла важность исследований и разработок в области управления и проектирования роботов различного типа, в том числе летающих, наземных и подводных [1–6]. В числе прочих актуальными становятся задачи, связанные с изучением и защитой подводной среды, проведением поисково-спасательных работ и разведывательных операций с использованием подводных роботов. Робототехника существенно расширяет возможности таких операций по сравнению с использованием судовых платформ. Вместе с тем, существующие в настоящее время подводные роботы обладают определенными ограничениями, связанными, в первую очередь, с невысокой маневренностью. К тому же они могут перемещаться только непосредственно в воде, хотя в ряде случаев возникают задачи, требующие перемещения робота по дну, а также в прибрежной зоне.

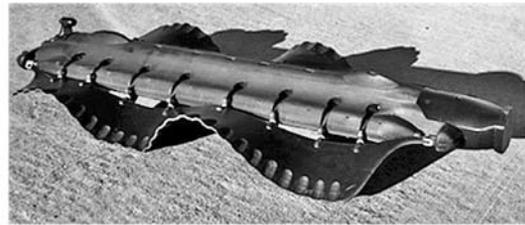
Эти ограничения могут быть преодолены за счет использования иного принципа перемещения роботов, заимствованного из живой природы, а именно, принципа перемещения за счет волнообразного движения плавников, свойственного скатам и некоторым другим подводным существам. Этот способ движения

позволяет обеспечить значительную маневренность, а также стабилизацию при наличии течения. Кроме того, такой способ позволяет перемещаться не только в воде, но и по дну моря, а также "выползти" на берег и перемещаться в пределах береговой зоны. Все эти особенности позволяют существенно расширить круг задач, выполняемых подводными роботами как при дистанционном управлении, так и в автономном плавании. Отметим также относительную бесшумность их работы, что также является преимуществом при решении ряда задач.

Отметим, что в литературе уже есть информация о работах по созданию роботов такого типа [6, 7]. Ряд компаний уже разработали роботы с волнообразной двигательной установкой. Так, компания Noa-magine разработала модель робота "Морской страж" (Sea Sentinel UUVs) [8]. Задачей системы, частью которой является этот робот, является сбор химических, акустических и визуальных данных в море и проведение непрерывных измерений с высоким разрешением в течение 300 дней в году. Такие роботы могут использоваться, среди прочего, для мониторинга потенциально загрязняющих воду обломков. К настоящему времени завершены работы над полномасштабным прототипом робота, способного выполнять беспилотные миссии и проводить первые лоцманские исследования в районе Балтийского моря. На рис. 1, а показана кон-



a)



б)

Рис. 1. Подводный робот Морской страж (Sea Sentinel) (а); робот с гибким движителем (Pliant Energy Systems) (б)
 Fig. 1. Underwater robot Sea Sentinel(a); Flexible Propulsion Robot (Pliant Energy Systems) (б)

струкция робота, разработанного в этой компании [9].

Компания Pliant Energy Systems также разработала проект робота с волнообразным движителем [10]. Этот робот, снабженный плавниками, может перемещаться не только в воде, но и на прибрежной полосе, а также по льду, снегу и песку (рис. 1, б). Аналогичная конструкция робота с плавниками (Bionic Fin Wave) для перемещения внутри труб большого диаметра была разработана компанией Festo [11].

Принцип работы волнообразного движителя

У каждого вида живых существ есть свой уникальный способ перемещения, который адаптирован к среде. Скаты используют следующий принцип волнообразного движения [12, 13]: плавник совершает волнообразное движение, при котором волна движется по направлению от передней кромки плавника к задней кромке или в обратном направлении, создавая гидродинамическую силу, обеспечивающую движение вперед или назад соответственно. Направление движения волны противоположно направлению плавания, поэтому скат может изменить направление движения на противоположное [14].

Кинематическая схема гибкого плавника показана на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения: $O_q X_q Y_q Z_q$ — система координат плавника, связанная с корпусом робота; $O_r X_r Y_r Z_r$ — система координат в вертикальном сечении плавника, в которой можно описать движение образующей поверхности (луча) плавника. Координаты произвольной точки плавника S определяются в системе координат $O_q X_q Y_q Z_q$ как

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{pmatrix} = I \begin{pmatrix} 0 \\ h \cos(\theta_f) \\ h \sin(\theta_f) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} O_r O_q \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_q \\ h \cos(\theta_f) \\ h \sin(\theta_f) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\begin{pmatrix} 0 \\ h \cos(\theta_f) \\ h \sin(\theta_f) \end{pmatrix}$ — координаты точки S в системе координат $O_r X_r Y_r Z_r$; I — матрица поворота; h — расстояние от точки S до базовой линии $O_r O_q$.

Угловое положение $\theta_{sf}(s, t)$ точки S может быть записано в виде [14]

$$\theta_{sf}(s, t) = \theta_{sf \max}(x_q) \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - 2\pi \frac{x_q}{\lambda} + \vartheta_0\right), \quad (2)$$

где $\theta_{sf \max}$ — амплитуда волны, соответствующая точке S плавника на рис. 2; $1/T$ — частота колебаний плавника; λ — длина волны; $2\pi \frac{x_q}{\lambda}$ — фаза колебания, соответствующая точке S плавника; ϑ_0 — исходная фаза начального луча плавника.

Линейную скорость плавника, совершающего волнообразное движение, можно вычислить с использованием закона сохранения импульса [15], в соответствии с которым масса воды, выталкиваемой плавником V_{fin} , определяется из соотношения

$$M_{water} V_{water} = M_{fin} V_{fin}, \quad (3)$$

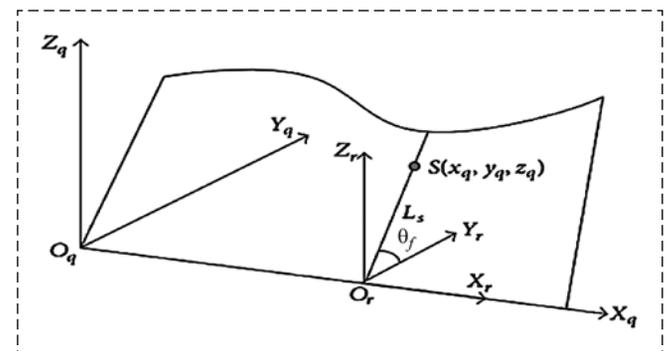


Рис. 2. Кинематическая схема волнообразного плавника
 Fig. 2. Kinematic scheme of undulating fin

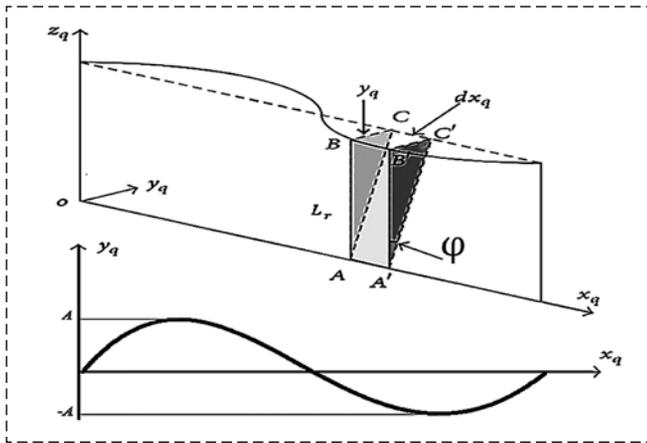


Рис. 3. К определению приращения массы жидкости [15]
Fig. 3. The definition of the mass increment of a liquid [15]

где V_{water} , V_{fin} — скорость жидкости и скорость плавника относительно неподвижной системы координат $O_\omega X_\omega Y_\omega Z_\omega$ соответственно, а M_{fin} и M_{water} — масса плавника и массы воды, перемещаемой плавником.

Масса воды M_{water} может быть получена как интеграл от объема воды, которая окружена волнообразным плавником (рис. 3). При этом приращение массы жидкости между треугольниками ΔABC и $\Delta A'B'C'$ выражается как

$$dM_{\text{water}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{water}} |y_q| \sqrt{L_r^2 - y_q^2} dx, \quad (4)$$

где ρ_{water} — плотность жидкости; L_r — гипотенуза треугольника ABC .

Из рис. 3 следует, что $\sqrt{L_r^2 - y_q^2} = L_r \cos \varphi$. Таким образом,

$$M_{\text{water}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{water}} \int_0^\lambda |y_q| \sqrt{L_r^2 - y_q^2} dx.$$

Можно также определить $y_q(x_q, z_q, t)$:

$$y_q(x_q, z_q, t) = A(x_q, z_q) \sin(\omega t - kx_q), \quad (5)$$

где $A(x_q, y_q)$ — амплитуда волны; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — частота колебаний; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Предположим, что в начальный момент времени $t = 0$

$$y_q(x_q, z_q, 0) = -A(x_q, z_q) \sin(kx_q);$$

$$M_{\text{water}} = \rho_{\text{water}} L_r \cos \varphi \int_0^{\lambda/2} |-A \sin(kx_q)| dx,$$

т. е.
$$M_{\text{water}} = \frac{2\rho AL_r \cos \varphi}{k}. \quad (6)$$

Из соотношения (3) можно найти скорость плавника:

$$V_{\text{fin}} = \frac{M_{\text{water}}}{M_{\text{fin}}} V_{\text{water}}. \quad (7)$$

Вместе с тем, можно записать, что

$$V_{\text{water}} + V_{\text{fin}} = V,$$

где V — скорость жидкости, толкаемой поверхностью плавника относительно системы координат плавника $O_q X_q Y_q Z_q$. Таким образом,

$$V_{\text{fin}} = V - V_{\text{water}} = \frac{M_{\text{water}}}{M_{\text{water}} + M_{\text{fin}}} V, \quad (8)$$

где $V = \lambda f = \frac{\omega \lambda}{2}$.

С учетом выражения (6) получаем

$$V_{\text{fin}} = \frac{(2\rho AL_r \cos \varphi)}{(2\rho AL_r \cos \varphi) + kM_{\text{fin}}} (\lambda f) = \xi(\lambda f), \quad (9)$$

$$0 < \xi < 1.$$

Здесь параметр ξ определяет влияние геометрических характеристик плавника на скорость движения образующей его поверхности луча на рис. 2. Из полученного соотношения можно заключить, что скорость плавника V_{fin} прямо пропорциональна частоте колебаний ω и длине волны λ .

Гидромеханический анализ

Перемещение робота обеспечивается тягой, создаваемой длинным гибким плавником, которая создается взаимодействием мембраны и жидкости. Поверхность мембраны изменяется циклически, поэтому мы выбираем для исследования один период движения для расчета средней тяги. Вся мембрана разделена на ряд малых элементов (рис. 4), и силы, действующие на элементы за период, суммируются для получения средней тяги. Взаимодействие между поверхностью малого элемента и жидкостью определяется следующими уравнениями [16]:

$$df_n = \frac{dF_n}{dS} = -\frac{1}{2} \rho C_n \|V_n\| V_n; \quad (10)$$

$$df_\tau = \frac{dF_\tau}{dS} = -\frac{1}{2} \rho C_\tau \|V_\tau\| V_\tau,$$

где dF_n — нормальная сила, действующая на поверхность элемента; dF_τ — тангенциальная сила, действующая на поверхности элемента; dS — площадь элемента; ρ — плотность жидкости; C_n — коэффициент тангенциального сопротивления [15]; C_τ — коэффициент вязкого сопро-

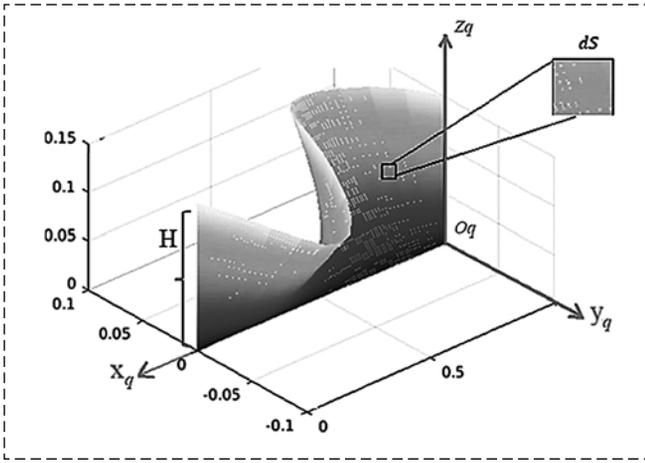


Рис. 4. Элемент мембраны плавника
Fig. 4. Fin membrane element

тивления жидкости; V_n — нормальная скорость относительно жидкости; V_τ — тангенциальная скорость элемента относительно жидкости.

Следовательно, нормальная и тангенциальная силы плавника могут быть получены как интегралы по поверхности мембраны от сил, действующих на все элементы:

$$F_n = \iint_{\Omega(t)} f_n dS, \quad F_\tau = \iint_{\Omega(t)} f_\tau dS, \quad (11)$$

где F_n — нормальная сила, действующая на плавник; F_τ — тангенциальная сила, действующая на него; $\Omega(t)$ — поверхность мембраны в момент времени t . Предполагаем, что число Рейнольдса достаточно велико, поэтому жидкость считается невязкой и вязкостным эффектом можно пренебречь, что позволяет пренебречь и тангенциальной силой.

Гидродинамический анализ основан на трех основных допущениях:

1. Волнообразные движения лучей плавника заставляют плавник двигаться прямо вперед вдоль оси $O_q X_q$ без какого-либо вращения (рис. 4).

2. Волнообразные движения рассматриваются только относительно оси $O_q X_q$.

3. Число волн, образующихся на плавнике, — целое число.

Положение произвольной точки $S(x_q, y_q, z_q)$ на рис. 3 можно получить согласно (1) по формуле

$$\begin{pmatrix} x_{sq}(s, h, t) \\ y_{sq}(s, h, t) \\ z_{sq}(s, h, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} o_r o_q \\ h \cos(\theta_f(h, t)) \\ h \sin(\theta_f(h, t)) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Вектор скорости элемента поверхности S относительно системы координат $O_q X_q Y_q Z_q$ может быть получен в следующем виде:

$$\mathbf{V}_{sq} = \frac{dS(x_q, y_q, z_q)}{dt} = \begin{pmatrix} 0 \\ -h\theta'_{ft} \sin(\theta_f) \\ h\theta'_{ft} \cos(\theta_f) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\text{где } \theta'_{ft} = \frac{d\theta_f(h, t)}{dt} = -\frac{2\pi}{T_i} \theta_{if \max}(x_i) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} - \theta_{0i}\right).$$

Если линейная и угловая скорости начала координат системы координат $O_q X_q Y_q Z_q$ относительно инерциальной системы координат равны, соответственно,

$$\mathbf{V}_{wq} = (U_x, U_y, U_z)^T, \quad \boldsymbol{\omega}_{wq} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T, \quad (14)$$

то скорость элемента S относительно инерциальной системы отсчета может быть записана как

$$\mathbf{V}_{ws} = \mathbf{V}_{oq} + \boldsymbol{\omega}_{wq} \times \mathbf{r}_{qs} + \mathbf{V}_{qs}, \quad (15)$$

где \mathbf{r}_{qs} представляет собой вектор положения элемента S по отношению к системе координат $O_q X_q Y_q Z_q$. Скорость и угловая скорость начала координат этой системы относительно инерциальной системы отсчета можно принять равными $\mathbf{V}_{wq} = (U_x, 0, 0)$ и $\boldsymbol{\omega}_{wq} = (0, 0, 0)$ согласно сформулированным выше предположениям. Тогда скорость элемента S относительно инерциальной системы координат может быть представлена как

$$\mathbf{V}_{ws} = \mathbf{V}_{oq} + \mathbf{V}_{qs} = \begin{pmatrix} U_x \\ -h\dot{\theta}_f \sin(\theta_f(h, t)) \\ h\dot{\theta}_f \cos(\theta_f(h, t)) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Вектор \mathbf{n} , нормальный к поверхности элемента S , определяется по формуле

$$\mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{S}_q(s, h, t)}{\partial s} \times \frac{\partial \mathbf{S}_q(s, h, t)}{\partial h} = \begin{pmatrix} h\theta'_s \\ -\sin(\theta_f) \\ \cos(\theta_f) \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где

$$\theta_{fs}(s, h, t) = \theta_{sf \max}(x_s) \sin\left(\frac{2\pi t}{o} - 2\pi \frac{s}{\lambda}\right);$$

$$\theta'_{fs} = \frac{\partial \theta(s, t)}{\partial s} = \frac{2\pi}{\lambda} \theta_{sf \max} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - 2\pi \frac{s}{\lambda}\right),$$

а единичный нормальный вектор определяется из выражения (17) как

$$\mathbf{n}_0 = \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (h\theta'_s)^2}} \begin{pmatrix} h\theta'_s \\ -\sin(\theta_f) \\ \cos(\theta_f) \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Нормальная скорость \mathbf{V}_{sn} элемента S теперь может быть определена как

$$\mathbf{V}_{sn} = (\mathbf{V}_{ws}\mathbf{n}_0)\mathbf{n}_0, \quad (19)$$

или

$$\mathbf{V}_{sn} = \frac{U_x h\theta'_{fs} + h\theta'_{ft}}{1 + (h\theta'_s)^2} \begin{pmatrix} -h\theta'_{fs} \\ -\sin(\theta_f) \\ \cos(\theta_f) \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Используя соотношения (12), (13), (20), силу воздействия на плавник можно получить в виде

$$\begin{aligned} F_n &= -\frac{1}{2}\rho C_n \iint_{\Omega} \|\mathbf{V}_{sn}\| \mathbf{V}_{sn} dS = \\ &= -\frac{1}{2}\rho C_n \iint_{\Omega} \|\mathbf{V}_{sn}\| \mathbf{V}_{sn} \|\mathbf{n}\| dsdh = \\ &= -\frac{1}{2}\rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h\theta'_{fs}| |h\theta'_{fs}|}{1 + (h\theta'_s)^2} \times \\ &\quad \times (-h\theta'_s, -\sin(\theta_f), \cos(\theta_f))^T dsdh, \end{aligned} \quad (21)$$

где $D = \{(s, h) | 0 \leq s \leq L, 0 \leq h \leq H\}$; L — длина плавника; H — высота плавника. Проекции этой силы на оси координат $OXYZ$ определяются равенством

$$\begin{pmatrix} F_{nX} \\ F_{nY} \\ F_{nZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h\theta'_{fs}| (h\theta'_{fs})^2}{1 + (h\theta'_s)^2} dsdh \\ \frac{1}{2}\rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h\theta'_{fs}| |h\theta'_{fs}| \sin(\theta_f)}{1 + (h\theta'_s)^2} dsdh \\ -\frac{1}{2}\rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h\theta'_{fs}| |h\theta'_{fs}| \cos(\theta_f)}{1 + (h\theta'_s)^2} dsdh \end{pmatrix}. \quad (22)$$

В соответствии с принятыми допущениями данные аналитические выражения могут быть приведены к следующему виду:

$$\begin{pmatrix} F_{nX} \\ F_{nY} \\ F_{nZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\rho C_n (U_x + \lambda f)^2 D \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} D &= [2n_\lambda \theta_{\max} H^2 + \frac{n_\lambda \lambda^2}{2\pi^2 \theta_{\max}} \ln^2 \lambda - \\ &- \frac{n_\lambda \lambda^2}{4\pi^2 \theta_{\max}} \ln^2 (\sqrt{4\pi^2 \theta_{\max}^2 H^2 + \lambda^2} - 2\pi \theta_{\max} H) - \\ &- \frac{n_\lambda \lambda^2}{4\pi^2 \theta_{\max}} \ln^2 (\sqrt{4\pi^2 \theta_{\max}^2 H^2 + \lambda^2} + 2\pi \theta_{\max} H)], \end{aligned}$$

причем $n_\lambda = \frac{L}{\lambda}$ — число волн в плавнике.

Из приведенных соотношений следует, что генерируемая сила тяги зависит от частоты волны, ее амплитуды и длины, а также от числа волн, создаваемых плавником n_λ .

На рис. 5 показана зависимость изменения тяги плавника в формуле (23) от числа волн n_λ , частоты колебаний f (Гц) и амплитуды колебаний θ_{\max} , образующихся в плавнике.

Геометрические параметры предполагаемого плавника следующие:

- высота плавника (см. рис. 4) $H = 0,12$ м;
- длина плавника $L = 1$ м;
- коэффициент тангенциального сопротивления $C_n = 10$ [17].

Плотность жидкости принята равной $\rho = 1000$ кг/м³, а линейная скорость плавника $U_x = 0$.

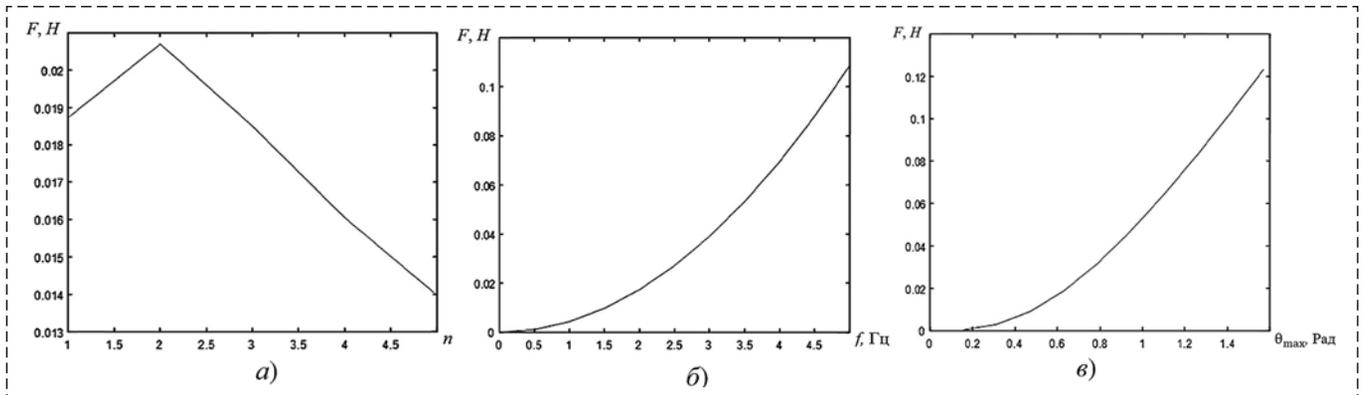


Рис. 5. Зависимость тяги от числа волн (а); частоты колебаний (б); амплитуды колебаний (в)

Fig. 5. Thrust vs: quantity wave in fin (a); undulating frequency (б); undulating amplitude (в)

Рис. 5, а соответствует частоте 2 Гц и максимальной волнообразной амплитуде $0,2\pi$. Волновые числа n_λ задавались равными 1, 2, 3, 4, 5. Видно, что тяга сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением волнового числа. В результате на плавнике образуется максимальная тяга при $n_\lambda = 2$.

Рис. 5, б соответствует частоте $0...5$ Гц и максимальной волнообразной амплитуде $0,2\pi$. Волновые числа n_λ приняты единичными. Видно, что тяга увеличивается нелинейно с увеличением частоты.

Рис. 5, в соответствует частоте 2 Гц и максимальной волнообразной амплитуде $0,2\pi...0,5\pi$. Волновые числа приняты единичными. Видно, что тяга увеличивается нелинейно с увеличением амплитуды.

Исследование прототипа робота

После изучения волнообразного плавника и нахождения кинематических и динамических уравнений одного плавника необходимо найти механический прототип плавника который создавал бы синусоидальную волну на плавнике. При этом число активных лучей плавника должно быть выбрано таким образом, чтобы сохранить его основные кинематические характеристики.

Уравнение (2) определяет угловое положение каждой точки плавника в связанной с ним системе координат $O_q X_q Y_q Z_q$ в том случае, когда плавник представляет собой гибкую мембрану. При механической реализации мы разделяем плавник на n ребер, соединенных между собой эластичной мембраной, как показано на рис. 6. Угловое положение ребра с номером i можно определить следующим образом [12–15]:

$$\theta_{if}(i, t) = \theta_{if \max}(x_i) \times \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - 2\pi \frac{x_q}{\lambda} + \vartheta_0\right), x_q = \frac{(i-1)}{(n-1)} L; \quad (24)$$

$$\theta_{if}(i, t) = \theta_{if \max}(x_i) \times \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - (i-1)\Delta P + \vartheta_0\right).$$

$$2\pi \frac{x_q}{\lambda} = 2\pi \frac{(i-1) L}{(n-1) \lambda} = 2\pi(i-1) \frac{\Delta L}{\lambda} = (i-1)\Delta P. \quad (25)$$

Здесь $\theta_{if \max}$ — амплитуда волны на i -м ребре плавника; θ_{0i} — начальная фаза i -го ребра; n —

общее число ребер; ΔP — фазовый сдвиг между двумя соседними ребрами, который не должен быть больше $\Delta P \leq \pi/2$. Таким образом, общее число ребер n в приведенной кинематической схеме должно удовлетворять следующему выражению:

$$\frac{\pi}{2} \geq 2\pi \frac{1}{(n-1)} \frac{L}{\lambda}, \text{ или } n \geq 4n_\lambda + 1. \quad (26)$$

Для проверки полученных результатов была реализована модель подводного робота, показанная на рис. 7.

Исследуемый робот работает, используя принцип волновой тяги. Его двигательная система состоит из двух симметричных двусторонних плавников. Был выбран механизм, в котором ребра плавника соединены на базовой линии, и каждое ребро приводится в движение непосредственно двигателем. Чтобы упростить механическую конструкцию, число двигателей, используемых в модели, показан-

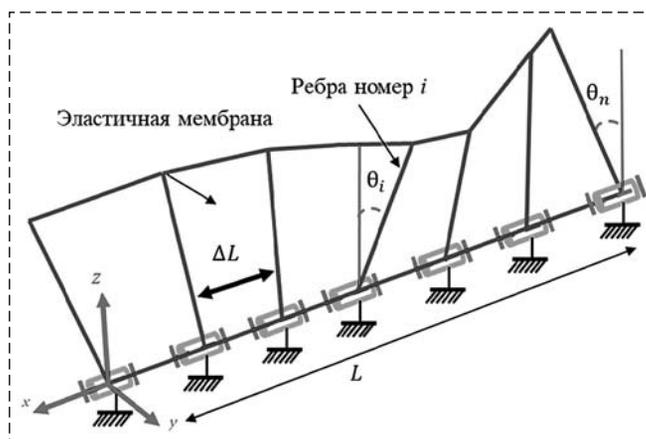


Рис. 6. Дискретная кинематическая схема плавника
Fig. 6. Discrete kinematic scheme of the fin

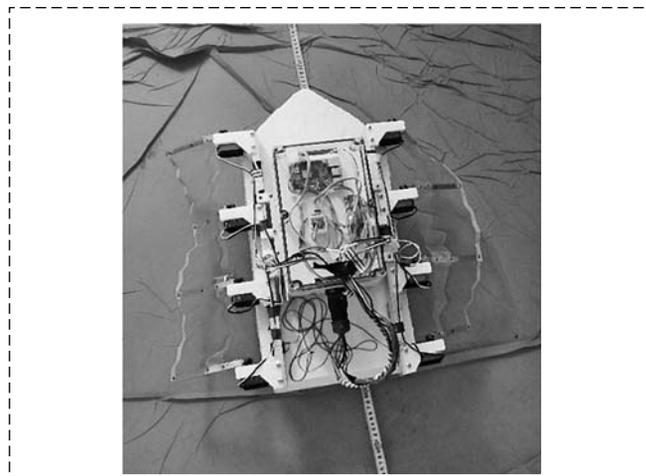


Рис. 7. Прототип робота
Fig. 7. Robot prototype

ной на рис. 7, было уменьшено. Принцип работы и способность робота двигаться и маневрировать остались прежними.

Система управления робота состоит из следующих основных частей:

- Raspberry Pi 4 для формирования команд управления восемью серводвигателями;
- модель PCA-9685 16bit;
- блок питания;
- датчик (IMU GY955-AHRS) для определения углового положения и угловой скорости робота.

Поскольку рассматривается движение робота в двумерной плоскости OXY (рис. 8), то робот может вращаться относительно мгновенного центра вращения, изменяя соотношение скоростей, определяемых правым и левым плавниками.

В соответствии со схемой на рис. 8 угловая и линейная скорости робота определяются соответственно следующими формулами:

$$\omega_{\text{robot}} = \frac{V_{R-fin} - V_{L-fin}}{2b}; \quad (27)$$

$$V_{\text{robot}} = \frac{V_{R-fin} + V_{L-fin}}{2}, \quad (28)$$

где V_{R-fin} , V_{L-fin} — линейные скорости, определяемые правым и левым плавниками соответственно; b — расстояние между плавником и центром массы робота. Можно назвать такое управление дифференциальным по аналогии с аналогичным способом управления наземным мобильным роботом с дифференциальным приводом колес.

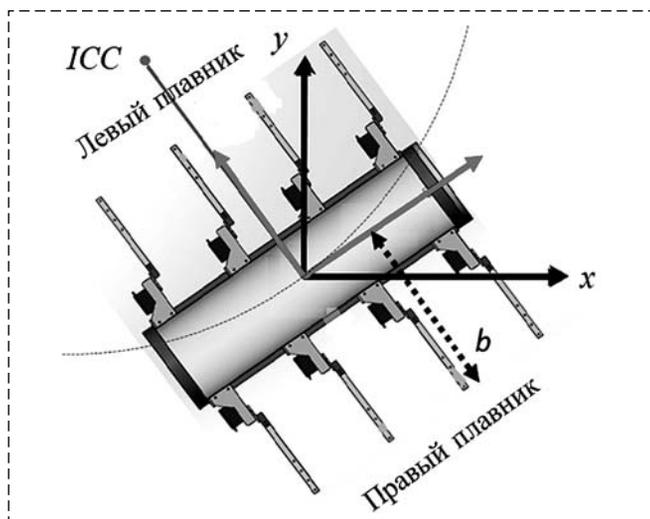


Рис. 8. Модель робота
Fig. 8. Model of robot

Результаты экспериментов

Эксперименты проводились с прототипом робота в бассейне размером $2,4 \times 2,4 \times 0,4$ м. Благодаря беспроводной связи робот получал команды, отправленные с компьютера. Проводились эксперименты для основных способов движения. Целью эксперимента были проверка маневренности и тяговых характеристик робота, а также определение основных параметров его движения, включая среднюю линейную и угловую скорости, а также силу тяги плавника при различной частоте и амплитуде движений плавника.

Для измерения скорости робота в "маршевом режиме" применялась высокоскоростная камера, размещенная над бассейном. Частота колебаний изменялась от 0,5 Гц до 2 Гц, а амплитуды колебаний принималась равными 10, 15, 20 и 25° соответственно.

На рис. 9 представлены результаты проведенных экспериментов в форме зависимости линейной скорости робота от частоты и от амплитуды колебаний плавников при линейной аппроксимации полученных при эксперименте результатов. Можно видеть, что увеличение скорости за счет амплитуды происходит значительно более эффективно, чем за счет частоты.

Эксперименты показали, что робот плавает с самой высокой скоростью при амплитуде 25°. При этом на параметры движения влияют два ограничения. Во-первых, мембрана, покрывающая лучевые плавники, ограничивает их колебания. Во-вторых, максимальное значение гидродинамических сил, образуемых длинными ребрами, при определенной амплитуде также ограничивает их колебания.

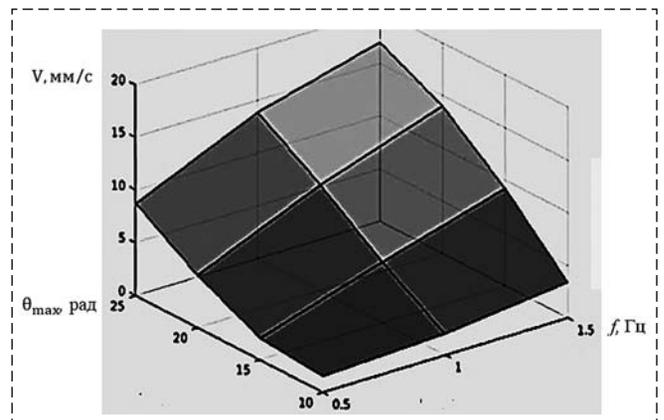


Рис. 9. Зависимость линейной скорости робота от частоты и амплитуды колебаний плавника
Fig. 9. Linear speed of the robot vs fin oscillation frequency and amplitude

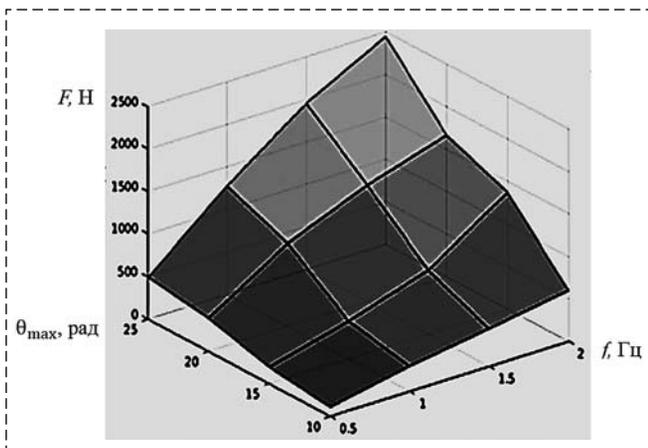


Рис. 10. Сила тяги робота
Fig. 10. Propulsion force robot

Эксперименты также показывают, что робот плавает с самой высокой скоростью при частоте колебаний 1,5 Гц. Проводились эксперименты при частотах 0,5, 1, 1,5, 2 Гц, которые показали, что при частоте 0,5 Гц робот получает слишком малую тягу для поступательного движения, а когда частота равна или превышает 2 Гц, образовавшаяся большая водяная волна делает плавание робота неустойчивым. Таким образом, всегда существует диапазон частот, зависящий от конструкции робота, в котором

управление с помощью гибких плавников является эффективным. Более того, можно установить и частоту, при которой обеспечивается наиболее эффективное управление. В данном эксперименте максимальная скорость движения робота была достигнута в установившемся режиме при частоте 1,5 Гц. При проведении трех экспериментов при одинаковых условиях средняя скорость составила около 170 мм/с, а максимальная — около 200 мм/с.

Для исследования силы тяги робота была проведена серия экспериментов, в которых сила тяги измерялась электронным безменом с точностью 5 г. Эксперименты проводили в диапазоне частот от 0,5 Гц до 2 Гц, с амплитудой колебаний, равной 10, 15, 20 и 25° соответственно в маршевом режиме. На рис. 10 представлены результаты проведенных экспериментов, которые показали практически линейную зависимость силы тяги робота как от частоты, так и от амплитуды колебаний плавников.

На следующем этапе экспериментов были исследованы основные режимы движения. Во-первых, это походный режим прямолинейного движения (рис. 11) (вперед—назад) при условии $\theta_{fmax} = 25^\circ$ и $f = 1$ Гц. В этом режиме важно, чтобы скорость плавников была одинаковой независимо от того, идет ли движение вперед или назад.

При анализе вращения робота рассматривались два случая. Первый случай — вращение с неподвижным центром тяжести робота как показано на рис. 12, а. В этом случае угловая скорость определяется из уравнения (27) при условии $V_{R-fin} = V_{L-fin}$. Второй случай — вращение с подвижным центром тяжести робота, как показано на рис. 12, б, когда угловая скорость и радиус вращения определяются из уравнений (27), (28) при условии $V_{R-fin} \neq V_{L-fin}$.

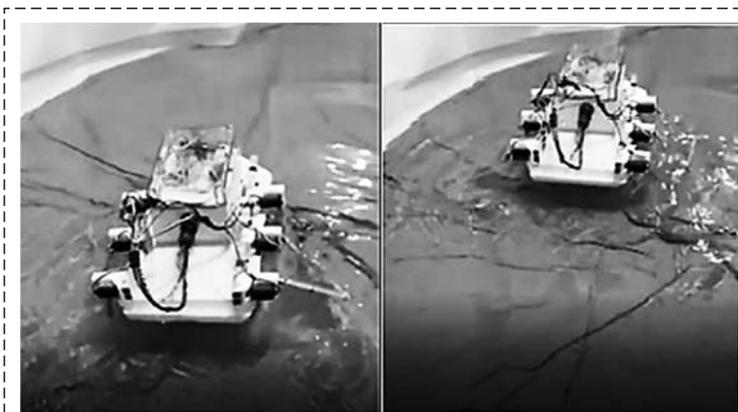


Рис. 11. Походный режим (Вперед)
Fig. 11. Marching mode (Forward)

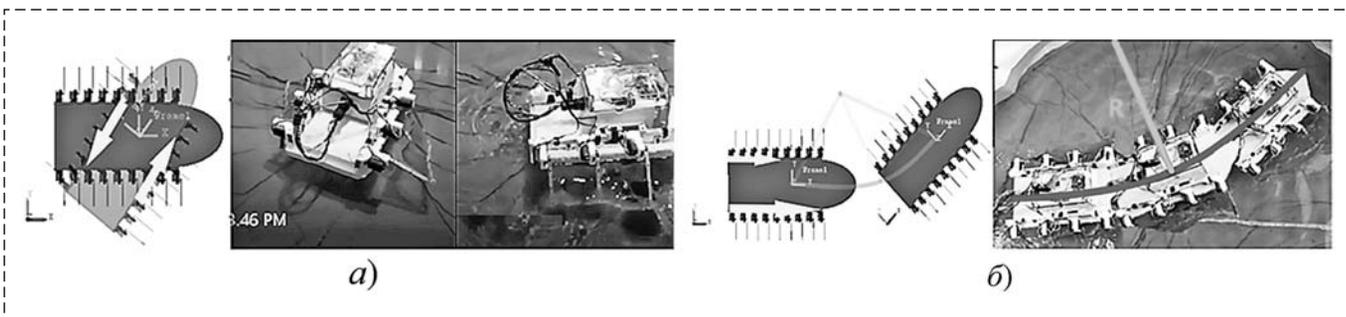


Рис. 12. Движение с неподвижным центром тяжести (а); движение с подвижным центром тяжести (б)
Fig. 12. Rotation with a fixed center of gravity (а); Rotation with a moving center of gravity (б)

Заклучение

В работе представлены результаты предварительного исследования волнообразного движителя подводного робота. Представлены кинематическая и динамическая модели гибкого плавника и исследовано влияние параметров движителя на скорость и силу тяги, развиваемую движителем робота.

В процессе исследования был создан макет робота и проведена серия экспериментов в целях анализа основных способов движения и проверки теоретических результатов. Показана возможность определения оптимальных значений параметров, при которых сохраняется устойчивость движения и обеспечиваются наилучшие скоростные показатели. Продемонстрированы маневренные возможности робота, близкие к возможностям наземного мобильного робота с дифференциальным приводом колес. Результаты исследований показывают, что разработка роботов с гибким плавником является перспективной и позволяет существенно повысить возможности таких устройств.

Список литературы

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2018. Sep. 18. P. 270–279.
2. Serebrennyi V., Boshliakov A., Ovsiankin G. Active stabilization in robotic vision systems // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 161. P. 03019.
3. Mashkov K., Rubtsov V., Rubtsov I. Development of robotics technologies in agriculture // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. P. 05004.

4. Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Kononov K. V. Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas // AIP Conference Proceedings. 2019 Dec 17. Vol. 2195, N. 1. P. 020009.
5. Serebrennyi V., Boshliakov A., Ogorodnik A. Current control in the drives of dexterous robot grippers // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2018 Sep. 18. P. 239–248.
6. Wang S., Wang Y., Wei Q., Tan M., Yu J. A bio-inspired robot with undulatory fins and its control methods // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2016 Oct 31. Vol. 22, N. 1. P. 206–216.
7. Bi S., Niu C., Cai Y., Zhang L., Zhang H. A waypoint-tracking controller for a bionic autonomous underwater vehicle with two pectoral fins // Advanced Robotics. 2014. May 19. Vol. 28, N. 10. P. 673–681.
8. NOA MARINE unmanned technologies as an intelligent network for remote underwater observation of the ecosystems of the Baltic Sea. URL: https://fundacjamare.pl/file/repository/Michal_Latacz_NOA_MARINE_1.pdf.
9. Engineers Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles. URL: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.
10. Pliant Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot. URL: <https://www.pliantenergy.com/robotics>
11. URL: https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id_45231/
12. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus* // Mechanism and machine theory. 2009 Mar 1. Vol. 44, N. 3. P. 633–645.
13. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion // IEEE Journal of oceanic engineering. 1999 Apr. Vol. 24, N. 2. P. 237–252.
14. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012 Nov. 26, Vol. 19, N. 1. P. 191–200.
15. He J., Zhang Y. Development, and motion testing of a robotic ray // Journal of Robotics. 2015 Jan 1.
16. Wang S., Dong X., Shang L. J. Thrust analysis of the undulating ribbon-fin for biomimetic underwater robots // 2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing. 2011. Jul 25. Vol. 1. P. 335–340.
17. Benson T. Shape effects on drag. NASA Webpage. URL: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/shaped.html>. 2004.

Study of an Underwater Robot with an Undulating Propulsion Fin

A. Ahmad, aws.ahmad318@gmail.com, Y. Wassouf, thelegend990@gmail.com,
K. V. Kononov, bmstu.kononov2011@yandex.ru, A. S. Yuschenko, arkadyus@mail.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Yuschenko Arkady S., Dr. of Sc., Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: arkadyus@mail.ru

Accepted on July 25, 2022

Abstract

The article is devoted to the study and analysis of the mechanism of undulating propulsion in the case of its application in underwater robots. It gives a brief review of studies related to developing a mathematical model of the movement of an underwater robot. Robot using two-symmetry undulating fin. This mathematical model imitates the movement of some fish species, such as batoid rays. The purpose of the study was to substantiate the possibility of creating a propulsion mechanism. In this mechanism the undulating movement of the fin is provided by individual elements controlled by servomotors. With appropriate control, these movements provide the propagation of the wave in the flexible fin of the robot. The advantage of this approach is a significant increase in the maneuverability of the device compared to existing traditional models. Also, the

movement becomes almost silent. The experiments performed on a robot prototype. As a result, a relation is found between the parameters of the undulating movement and the linear speed and thrust of each fin. The parameters of undulating movement such frequency and amplitude are analyzed, to provide stable movement of the underwater robot. The experiments confirmed the possibility of implementing the proposed control method. They Showed the possibilities of controlling the direction of propulsion force by changing oscillating phase of each fin ray. Also, the possibilities of controlling the thrust of the fin by changing the amplitude and frequency of undulating movement of the fin.

Keywords: undulating propulsion, fin, thrust force, discrete kinematic scheme, hydromechanical analysis, differential model

For citation:

Ahmad A., Wassouf Y., Konovalov K. V., Yuschenko A. S. Study of an Underwater Robot with an Undulating Propulsion Fin, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 607–616.

DOI: 10.17587/mau.23.607-616

References

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2018, Sep. 18, pp. 270–279, Springer, Cham.
2. Serebrennyi V., Boshliakov A., Ovsiankin G. Active stabilization in robotic vision systems, *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 161, p. 03019.
3. Mashkov K., Rubtsov V., Rubtsov I. Development of robotics technologies in agriculture, *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 05004.
4. Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Konovalov K. V. Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas, *AIP Conference Proceedings*, 2019, Dec. 17, vol. 2195, no. 1, p. 020009.
5. Serebrennyi V., Boshlyakov A., Ogorodnik A. Current control in the drives of dexterous robot grippers, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2018 Sep. 18, pp. 239–248.
6. Wang S., Wang Y., Wei Q., Tan M., Yu J. A bio-inspired robot with undulatory fins and its control methods, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016 Oct 31, vol. 22, no. 1, pp. 206–216.
7. Bi S., Niu C. Cai Y., Zhang L., Zhang H. A waypoint-tracking controller for a bionic autonomous underwater vehicle with two pectoral fins, *Advanced Robotics*, 2014, May 19, vol. 28, no. 10, pp. 673–681.
8. NOA MARINE unmanned technologies as an intelligent network for remote underwater observation of the ecosystems of the Baltic Sea, available at: https://fundacjamare.pl/file/repository/Michal_Latacz_NOA_MARINE_1.pdf
9. Engineers Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles, available at: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.
10. Pliant Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot, available at: <https://www.pliantenergy.com/robotics>
11. Available at: https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id_45231/
12. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*, *Mechanism and machine theory*, 2009, Mar. 1, vol. 44, no. 3, pp. 633–645.
13. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion, *IEEE Journal of oceanic engineering*, 1999 Apr, vol. 24, no. 2, pp. 237–252.
14. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, Nov. 26, vol. 19, no. 1, pp. 191–200.
15. He J., Zhang Y. Development, and motion testing of a robotic ray, *Journal of Robotics*, 2015 Jan. 1.
16. Wang S., Dong X., Shang L. J. Thrust analysis of the undulating ribbon-fin for biomimetic underwater robots, *2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, 2011, Jul 25, vol. 1, pp. 335–340.
17. Benson T. Shape effects on drag. NASA Webpage, available at: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/shaped.html.2004>.

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 26.08.2022. Подписано в печать 10.10.2022. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Заказ МН1122. 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