

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 23

2022

№ 10

Издаётся с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:

БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.

ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.

ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:

АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН

БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН

ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН

ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН

КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН

КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН

КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН

ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН

РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН

СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН

СИГОВ А. С., акад. РАН

СОЙФЕР В. А., акад. РАН

СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН

ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН

ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН

ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН

ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН

ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция

GROUMPOS P. P., PhD, Греция

ISIDORI A., PhD, Италия

KATALINIC B., PhD, Австрия

LIN CH.-Y., PhD, Тайвань

MASON O. J., PhD, Ирландия

ORTEGA R. S., PhD, Франция

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США

STRZELECKI R. M., PhD, Польша

SUBUDHI B. D., PhD, Индия

АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан

ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.

ЖУКОВ И. А., д.т.н.

ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.

КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.

ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.

ЛОХИН В. М., д.т.н.

МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Petrenko V. I., Tebueva F. B., Gurchinsky M. M., Pavlov A. S. Method of Multi-Agent Reinforcement Learning in Systems with a Variable Number of Agents 507

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Марчук Е. А., Калинин Я. В., Малолетов А. В. Компенсация отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота по силам натяжения тросов 515

- Попов И. П. Стабилизированный ротатор для мехатронных автоматических систем .. 523

- Бусурин В. И., Чжэ Лю, Кудрявцев П. С. Управление бесконтактным профилометром при сканировании поверхностей сложного профиля 529

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА,
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Атыгаев Т. Б., Ивель В. П., Герасимова Ю. В. Адаптивное управление планированием реактивного снаряда на пассивном участке полета по программно-заданной траектории 536

- Лемак С. С., Белоусова М. Д., Альчиков В. В. Задача динамической имитации полета летательного аппарата на робототехническом стенде 546

- Веиси С., Любимов В. В. Задача сближения двух спутников на орбите методом численного моделирования 555

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. 10

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

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- Petrenko V. I., Tebueva F. B., Gurchinsky M. M., Pavlov A. S. Method of Multi-Agent Reinforcement Learning in Systems with a Variable Number of Agents 507

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Marchuk E. A., Kalinin Ya. V., Maloletov A. V. Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement 515

- Popov I. P. Stabilized Rotator for Mechatronic Automatic Systems 523

- Busurin V. I., Zhe L., Kudryavtsev P. S. Control of Contactless Profilometer for Scanning Surfaces of Complex Profile 529

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Atygayev T. B., Ivel V. P., Gerasimova Y. V. Synthesis of a Control System for Planning a Rocket Projectile on a Passive Flight Section along a Program-Defined Trajectory 536

- Lemak S. S., Belousova M. D., Alchikov V. V. To the Problem of Motion Cueing Simulation on a Robotic Stand for Aircraft Flight 546

- Veisi S., Lyubimov V. V. The Rendezvous Mission of Two in-Orbit Sattelites Using Numerical Simulation 555

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

V. I. Petrenko, vipetrenko@ncfu.ru, **F. B. Tebueva**, ftebueva@ncfu.ru,
M. M. Gurchinsky, gurmikhail@yandex.ru, **A. S. Pavlov**, anspavlov@ncfu.ru,
North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation

Corresponding author: Petrenko Vyacheslav I., Cand. of Tech. Sc., Head of the department of organization and technology of information security, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, e-mail: vipetrenko@ncfu.ru

Accepted on July 11, 2022

Method of Multi-Agent Reinforcement Learning in Systems with a Variable Number of Agents

Abstract

Multi-agent reinforcement learning methods are one of the newest and actively developing areas of machine learning. Among the methods of multi-agent reinforcement learning, one of the most promising is the MADDPG method, the advantage of which is the high convergence of the learning process. The disadvantage of the MADDPG method is the need to ensure the equality of the number of agents N at the training stage and the number of agents K at the functioning stage. At the same time, target multi-agent systems (MAS), such as groups of UAVs or mobile ground robots, are systems with a variable number of agents, which does not allow the use of the MADDPG method in them. To solve this problem, the article proposes an improved MADDPG method for multi-agent reinforcement learning in systems with a variable number of agents. The improved MADDPG method is based on the hypothesis that to perform its functions, an agent needs information about the state of not all other MAS agents, but only a few nearest neighbors. Based on this hypothesis, a method of hybrid joint / independent learning of MAS with a variable number of agents is proposed, which involves training a small number of agents N to ensure the functioning of an arbitrary number of agents K , $K > N$. The experiments have shown that the improved MADDPG method provides an efficiency of MAS functioning comparable to the original method with varying the number of K agents at the stage of functioning within wide limits.

Keywords: multi-agent systems, machine learning, multi-agent reinforcement learning, collaborative learning, independent learning, variable number of agents

For citation:

Petrenko V. I., Tebueva F. B., Gurchinsky M. M., Pavlov A. S. Method of Multi-Agent Reinforcement Learning in Systems with a Variable Number of Agents, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 507–514.

DOI: 10.17587/mau.23.507-514

УДК 004.852

DOI: 10.17587/mau.23.507-514

В. И. Петренко, канд. техн. наук, зав.

кафедрой организации и технологии защиты информации, vipetrenko@ncfu.ru,

Ф. Б. Тебуева, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой компьютерной безопасности, ftebueva@ncfu.ru,

М. М. Гурчинский, аспирант, программист лаборатории робототехнических систем, gurmikhail@yandex.ru,

А. С. Павлов, инженер-лаборант кафедры компьютерной безопасности, anspavlov@ncfu.ru,

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

Метод мультиагентного обучения с подкреплением в системах с переменным числом агентов

Методы мультиагентного обучения с подкреплением являются одним из новейших и активно развивающихся направлений машинного обучения. Среди методов мультиагентного обучения с подкреплением одним из наиболее перспективных является метод MADDPG, достоинством которого является высокая сходимость процесса обучения. Недостатком метода MADDPG является необходимость обеспечения равенства числа агентов N на стадии обучения

и числа агентов K на стадии функционирования. В то же время целевые мультиагентные системы (МАС), такие как группы БПЛА или мобильных наземных роботов, являются системами с переменным числом агентов, что не позволяет применять в них метод MADDPG. Для решения данной проблемы в статье предложен усовершенствованный метод MADDPG для мультиагентного обучения с подкреплением в системах с переменным числом агентов. Усовершенствованный метод MADDPG базируется на гипотезе о том, что для выполнения своих функций агенту нужна информация о состоянии не всех прочих агентов МАС, а только нескольких ближайших соседей. На основе данной гипотезы предложен метод гибридного совместного/независимого обучения МАС с переменным числом агентов, который предполагает обучение некоторого небольшого числа агентов N для обеспечения функционирования произвольного числа агентов K , $K > N$. Проведенные эксперименты показали, что усовершенствованный метод MADDPG обеспечивает сопоставимую с оригинальным методом эффективность функционирования МАС при варьировании числа K агентов на стадии функционирования в широких пределах.

Ключевые слова: мультиагентные системы, машинное обучение, мультиагентное обучение с подкреплением, совместное обучение, независимое обучение, переменное число агентов

Introduction

With the development of reinforcement learning methods more and more complex problems fall into the area of interest of researchers. One of the newest and actively developing areas of reinforcement learning is multi-agent reinforcement learning MDRL multi-agent systems (MAS). The interest in the MAS is due to two reasons: 1) economic efficiency of using, instead of one complex agent, a set of technically simpler agents with comparable total productivity; 2) higher efficiency of decentralized problem-solving using MAS in comparison with similar centralized methods [1–3].

MAS find application in such areas [4] how production [5], transportation, smart homes, robotics [6–9], aviation, infrastructure facilities, medicine [10] and etc. An important problem in the development of MAS is the ambiguity and nontriviality of the synthesis of the policy of behavior of individual agents according to the specified target indicators of the MAS [11–13]. At the same time, single-agent reinforcement learning SDRL has established itself as a powerful and versatile tool for solving intellectual problems at a level comparable to that of a person [13–15]. Taken together, these factors determine the relevance of development single-agent deep reinforcement learning (SDRL) for use in MAS in the form of MDRL.

The two main challenges of MDRL are learning convergence and scalability [16]. The scalability problem also includes the problem of the possibility of dynamically changing the number of agents during the operation of the MAS. The problem of the possibility of dynamically changing the number of agents is of particular importance in the context of mobile MAS. Mobile MAS such as UAV groups [17] or ground mobile robots, in comparison with other types of MAS, are characterized by functioning in a non-deterministic environment with a relatively

high probability of failure of individual agents, unstable bandwidth and topology of communication channels [18] and etc. Also, in mobile MAS, higher requirements for the reliability of control methods [19, 20]. Calculation error [21, 22] can damage and disable mobile MAS agents. These factors lead to the fact that mobile MAS in the general case can be considered as MAS with a variable number of agents.

To ensure the operation of the MAS with a variable number of agents, the article proposes an improved method of deep multi-agent learning with reinforcement based on the gradient of the deterministic policy MADDPG. The article is structured as follows. Section 2 reviews the existing methods and problems of MDRL, substantiates the use of the MADDPG method as a prototype, and describes its main features. Section 3 describes the proposed improved MADDPG method. Section 4 presents experimental results confirming the effectiveness of the proposed improved MADDPG method.

Target setting

The target set in this paper is to develop a scalable MDRL method based on the MADDPG. The developed method must be able to work with a variable number of agents. In this case, the computational complexity should grow no more than linearly in a wide range of the number of MAS agents.

Current state of the problem

The subject of this work is such a type of MOP as learn cooperation [16]. The current section examines various approaches and methods of teaching cooperation from the point of view of their effectiveness, mechanisms for overcoming the nonstationary of the environment in the process of learning and functioning, and the possibility of working with

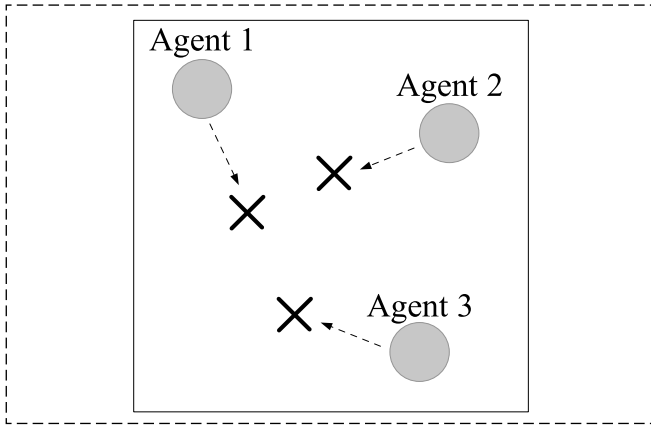


Fig. 1. An example of a spatially distributed problem [23]

a variable number of agents. This paper discusses MOS methods for cooperative MAS without explicit pre-organized or self-organizing communication, designed to solve spatially distributed problems. A generalized example of such a task is given in [23] under the name "Cooperative navigation", is shown on Fig. 1.

The problem includes an MAS of K agents (green circles) and an environment in which there is a set of K target objects (black crosses). The goal of MAS agents in this task is to occupy all target objects.

Let us introduce the following notation to describe the interaction between the MAS and the environment:

s — state of the environment, which also includes the state of agents $s \in S$, where S is set of possible states of the environment;

o_i — observation state of the environment available i -th agent, $o_i \in O_i$ where O_i is the set of possible observable states of the environment of the i -th agent;

a_i — action, undertaken by the i -th agent, $a_i \in A_i$ where A_i — set of possible actions of the i -th agent;

$r_i \in \mathbb{R}$ — reward, received by the i -th agent for performing an action a_i in a state of environment s , and the transition of the environment to the state s' ;

π_i — the policy of the i -th agent used by the i -th agent to transform the current observable state of the environment o_i in the probability distribution of the action to be taken a_i and parameterized by some vector of parameters θ_{π_i} :

$$\pi_i : O_i \times A_i \rightarrow [0; 1], \quad (1)$$

μ_i — notation for deterministic policy π_i :

$$\mu_i : O_i \times A_i \rightarrow \{0; 1\}, \quad (2)$$

Q_i — value function used by the i -th agent to estimate the expected value of the future cumulative reward when performing an action a_i in the observed state of the environment o_i , and parameterized by some vector of parameters θ_{Q_i} :

$$Q_i : O_i \times A_i \rightarrow \mathbb{R}. \quad (3)$$

According to the concept of reinforcement learning used by a policy agent π_i and the value function Q_i are approximations of some ideal policy π_i^* and/or ideal value function Q_i^* . In the process of training, the optimization of the parameter vectors takes place θ_{π_i} and θ_{Q_i} to improve the accuracy of the approximation. Deep reinforcement learning uses artificial neural networks as approximators (ANNs), and as vectors of optimized parameters θ_{π_i} and θ_{Q_i} the weights of the respective ANNs.

Methods MDRL can be divided according to the object of approximation into value-based methods and policy gradient methods, under the conditions of training on methods of joint training of agents and methods of independent training of agents. In value methods, the object of approximation is the value function Q_i , in gradient methods, the object of approximation is the policy π_i without/with value function Q_i . Value-based methods [24—31] presented mainly by methods based on the learning algorithm DQN [14] and its modifications DRQN [32]. The main disadvantages of value-based methods are the low learning efficiency compared to gradient methods. [33, 34] and focus on working with discrete action space A_i . An example of a gradient method for independent learning of agents is the method FTW [35]. The FTW method is an adaptation of the SDRL method based on the actor-learner structure IMPALA [36]. In article [23] it is shown that adapted gradient SDRL methods in multi-agent problems have weak convergence. This phenomenon is because the reward received by the i -th agent r_i depends not only on his actions a_i also from the actions of other agents $\{a_j | j \neq i\}$, therefore, the probability of obtaining the correct direction of the gradient with an increase in the number of agents decreases exponentially. To solve this problem at work [23] proposed a gradient method for collaborative learning of MADDPG agents (Multiagent Deep Deterministic Policy Gradient), DDPG-based (Deep Deterministic Policy Gradient) [37]. The DDPG method is based on the use of two ANNs. First ANNs — actor, used to approximate deterministic policy μ_i another ANNs. critic,

used to approximate the value function Q_i . In the MADDPG method, each agent uses its own ANNs pair actor and critic. At the entrance of the ANNs critic i -th agent approximating the value function Q_i , not only action is given a_i i -th agent, but also the actions of all other agents $\{a_j | j \neq i\}$. An important disadvantage of the MADDPG method is the need to ensure equality of the number of agents at the training stage. N and the number of agents at the stage of functioning K .

Based on the analysis of publications, the following conclusions can be drawn. The MDRL value methods are applicable only for problems with a discrete set of actions. Gradient MDRL methods with collaborative learning of agents are applicable to problems with a continuous set of actions and have good convergence, but they have poor scalability and fault tolerance. Gradient MDRL methods with independent learning of agents have good scalability and fault tolerance, however, they have problems with overcoming the nonstationary of the environment [16].

The listed features of gradient MDRL methods with joint and independent training of agents determine the relevance of the development of hybrid gradient MDRL methods with high convergence, scalability, and fault tolerance. In this paper, we propose such a hybrid method based on the MADDPG method and the concept of parameter separation. Details of the implementation of the parameter sharing concept in the enhanced MADDPG method are described in the next Section.

MADDPG method

In this work, the MADDPG method is taken as a basis for improvement in view of its following advantages [23]:

- 1) versatility of work in cooperative and competitive environments;
- 2) efficiency in comparison with other gradient methods of joint MDRL;
- 3) the choice of actions can be carried out from a continuous set of possible values.

The prototype of the multi-agent MADDPG method is the single-agent DDPG method. [37]. The essence of the DDPG method is as follows. Let there be a deterministic policy $\mu(o|\theta_\mu)$ making decisions by an agent to take an action a in the observed state of the environment o , parameterized by a parameter vector θ_μ . When describing the single-agent DDPG method, the subscript " i ", indicating

the agent number, not used in values. The DDPG method is based on the optimization of the parameter vector θ_μ with the aim of maximizing the expected total discounted remuneration J . New value of the vector of parameters θ_μ^{t+1} at each optimization iteration is determined by the formula:

$$\theta_\mu^{t+1} = \theta_\mu^t + \alpha \widehat{\nabla_{\theta_\mu^t} J}, \quad (4)$$

where θ_μ^t — the current value of the parameter vector θ_μ ; α — optimization step size; $\nabla_{\theta_\mu^t} J$ — gradient J over the vector of parameters θ_μ^t ; $\widehat{\nabla_{\theta_\mu^t} J}$ — estimated gradient value $\nabla_{\theta_\mu^t} J$.

According to the policy gradient theorem [38], provided that the medium is partially observable for the gradient $\nabla_{\theta_\mu^t} J$ the following relation is true:

$$\begin{aligned} \widehat{\nabla_{\theta_\mu^t} J} &\approx \mathbb{E}_{s \sim p^\mu} \left[\nabla_{\theta_\mu^t} Q_\mu(o, a | \theta_\mu^t) \Big|_{o=o_t, a \sim \mu(o_t | \theta_\mu^t)} \right] = \\ &= \mathbb{E}_{s \sim p^\mu} \left[\nabla_a Q_\mu(o, a | \theta_\mu^t) \Big|_{o=o_t, a \sim \mu(o_t | \theta_\mu^t)} \times \right. \\ &\quad \left. \times \nabla_{\theta_\mu^t} \mu(s | \theta_\mu^t) \Big|_{s=s_t} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

where $\mathbb{E}_{s_t \sim p^\mu}[x]$ — mathematical expectation of a quantity x provided that the state of the environment s_t has distribution p , policy-driven μ ; $Q_\mu(o, a | \theta_\mu^t)$ — value function Q , used by an agent at a point in time t when following a policy μ , taking as arguments the state of the environment o observed by the agent and the action taken by the agent a , parameterized by a parameter vector θ_μ^t ; $a \sim \mu(o_t | \theta_\mu^t)$ means the agent chooses an action a according to the distribution returned by $\mu(o_t | \theta_\mu^t)$.

Ideal value function Q_μ^* with full observability of the environment ($o \equiv s$) is given by the Bellman equation:

$$Q_\mu^*(s_t, a_t) = \mathbb{E}_{r_t, s_{t+1} \sim E^\mu} [r_t + \gamma Q_\mu^*(s_{t+1}, \mu(s_{t+1}))], \quad (6)$$

where $\mathbb{E}_{r_t, s_{t+1} \sim E^\mu}[x]$ — mathematical expectation of a quantity x subject to receiving the award r_t and the transition of the environment to some next state s_{t+1} according to the distribution returned by the math entity E when using the policy μ ; E — a mathematical entity describing the functioning of an environment, usually described as a mathematical model or an algorithm for the dynamics of the environment; $\gamma \in [0; 1]$ — a discounting parameter reflecting a

decrease in the importance of a subsequent reward r_{t+1} compared to the current award r_t .

In DDPG method for policy approximation μ and value functions Q_μ two ANNs are used, respectively named actor and critic. The weights of the ANNs actor act as a vector of parameters θ_μ policy μ , and the ANN weights critic act as a vector of parameters θ_Q value functions Q_μ . During training, optimization of the vector of parameters θ_μ is carried out according to the formula (4). Optimization of parameter vector values θ_Q is performed by a gradient machine learning method in order to minimize the following loss function:

$$L(\theta_Q) = \mathbb{E}_{s_t \sim p^\mu, a_t \sim \mu, r_t \sim E^\mu} [(Q_\mu(o_t, a_t | \theta_Q^t) - y_t)^2], \quad (7)$$

$$y_t = r(s_t, a_t) + \gamma Q^\mu(o_{t+1}, a_{t+1} | \theta_Q^t), \quad (8)$$

where y_t — expected total discounted remuneration.

The MADDPG method is a multi-agent extension of the DDPG method. For each i -th agent from N agents MAS uses two ANNs (Fig. 2, see the second side of the cover) for policy approximation μ_i and value functions Q_i — actor and critic, respectively. At the stages of learning and functioning i -th agent uses decision policy μ_i for transform the current observable state of the environment o_i in the action taken a_i . Value functions Q_i the i -th agent is used only at the training stage to assess the usefulness of the action taken by the i -th agent a_i .

In contrast to the single-agent variant of the value function $Q(o, a)$ the DDPG method, which takes as an argument the action a of one agent, a multi-agent value function $Q_i(o_i, a_i)$ method MADDPG takes as an argument the actions of all agents:

$$a = \{a_i | i = \overline{1, N}\}. \quad (9)$$

The following is a more rigorous mathematical description of the method, MADDPG. Consider a problem with N agents whose policies μ_i , $i = \overline{1, N}$ parameterized by parameter vectors θ_{μ_i} . Optimizing parameter vectors θ_{μ_i} using the gradient rise method, it is carried out according to the formula:

$$\theta_{\mu_i}^{t+1} = \theta_{\mu_i}^t + \alpha \widehat{\nabla_{\theta_{\mu_i}^t} J_i}, \quad (10)$$

where J_i — expected total discounted remuneration of the i -th agent.

Gradient $\widehat{\nabla_{\theta_{\mu_i}^t} J_i}$ calculated by the formula:

$$\widehat{\nabla_{\theta_{\mu_i}^t} J_i} \approx \mathbb{E}_{s \sim p^{\mu_i}} \left[\nabla_{a_i} Q_{\mu_i}(o, a | \theta_{Q_i}^t) \Big|_{o=o_t, a_i \sim \mu_i(o_t | \theta_{\mu_i}^t)} \times \nabla_{\theta_{\mu_i}} \mu_i(s | \theta_{\mu_i}^t) \Big|_{s=s_t} \right], \quad (11)$$

where $\theta_{Q_i}^t$ — vector of parameters of the value function Q_{μ_i} now t .

Q_{μ_i} updated to minimize the loss function $\mathcal{L}(\theta_{Q_i})$:

$$L(\theta_{Q_i}) = \mathbb{E}_{s_t \sim p^{\mu_i}, a_t \sim \mu_i, r_t \sim E} [(Q_{\mu_i}(o_t, a_t | \theta_{Q_i}^t) - y_t)^2], \quad (12)$$

$$y_t = r(s_t, a_t) + \gamma Q_{\mu_i}(o_{t+1}, a_{t+1} | \theta_{Q_i}^t). \quad (13)$$

In the article [23] the effectiveness of the MADDPG method was investigated when working with a fixed number of agents, the same for the training stage and for the execution stage. As the authors note, one of the further directions in the development of the method is its development for working with a variable number of agents.

Advanced MADDPG Method

The advanced MADDPG method differs from the original method in the following modifications.

1. At the training stage, N agents are used, at the functioning stage, an arbitrary number of $K > N$ agents.

2. At the stage of functioning, a "scope" is introduced for agents. The state of the environment o_i observed by the i -th agent includes the state of only those agents that fall into this scope. Let's designate the field of visibility, determined by objective reasons, such as the range of the communication channel or the range of visual observation, as the natural field of visibility. If more than $N - 1$ agents, the method uses an artificial scope, which includes $N - 1$ nearest agents (Fig. 3, *a*, see the second side of the cover). If the natural scope falls $M < N - 1$ other agents as states $(N - 1) - M$ of unobserved agents, their last observed state is used (Fig. 3, *b*, see the second side of the cover).

3. According to the concept of parameter sharing, the same decision-making policies are used for all agents. $\mu_i = \dots = \mu_N = \mu$ and the value function $Q_1 = \dots = Q_N = Q$ (Fig. 4, see the second side of the

cover). At the training stage, one ANN actor and one ANN critic are used for all agents. At the stage of functioning, all agents use identical copies of the actor ANN.

Expressions (10)–(13), taking into account the listed features, take the following form. Common policy for all agents μ parameterized by the parameter vector θ_μ . Parameter vector optimization θ_μ using the gradient rise method, it is carried out according to the formula:

$$\theta_\mu^{t+1} = \theta_\mu^t + \alpha \widehat{\nabla_{\theta_\mu} J_i}, \quad (14)$$

where J_i — expected total discounted remuneration of the i -th agent.

Gradient $\widehat{\nabla_{\theta_\mu} J_i}$, calculated by the formula:

$$\begin{aligned} \widehat{\nabla_{\theta_\mu} J_i} \approx \mathbb{E}_{s \sim p^\mu} \left[\nabla_{a_i} Q_\mu(o, a \mid \theta_Q^t) \Big|_{o=o_t, a_i \sim \mu_i(o_t \mid \theta_{\mu_i}^t)} \times \right. \\ \left. \times \nabla_{\theta_{\mu_i}} \mu_i(s \mid \theta_{\mu_i}^t) \Big|_{s=s_t} \right], \end{aligned} \quad (15)$$

where θ_Q^t — vector of parameters of the value function Q_μ at the moment t .

Q_μ updated to minimize the loss function $\mathcal{L}(\theta_Q)$:

$$L(\theta_Q) = \mathbb{E}_{s_t \sim p^\mu, a_t \sim \mu, r_t \sim E} [(Q_\mu(o, a \mid \theta_Q^t) - y_t)^2], \quad (16)$$

$$y_t = r(s_t, a_t) + \gamma Q_\mu(o_{t+1}, a_{t+1} \mid \theta_Q^t). \quad (17)$$

The modifications of the MADDPG method proposed in the work lead to the following results:

1. Computational complexity of each training step with an equal number of agents being trained N remains the same. The number of ANN actor and critic decreases by N times, while the number of acts of optimization of the weights of these ANNs increases by the same number of times at each learning step.

2. The introduction of the scope allows us to reduce the task of ensuring the functioning K agents to the task of ensuring the functioning N agents. As follows from the results of experimental studies in the next section, it is enough to conduct training $N < K$ agents, in contrast to the original method, where $N = K$.

3. Because $N < K$, in the improved MADDPG method, it will be possible to significantly reduce the computational complexity of MAS training to ensure the functioning K agents. Consider the factors affecting the computational complexity of one step of training when switching from training

N_1 agents for training N_2 agents in the MADDPG method with $N_2 > N_1$:

- 1) the number of ANN inputs actor and critic, which are responsible for information about other agents, increases by N_2/N_1 times, which leads to a quadratic increase in the number of connections in the ANN actor and critic and a corresponding increase in the number of necessary computational operations;

- 2) the input data space increases proportionally N_2/N_1 , which may require an increase in the number of perceptrons in individual layers of the ANN and lead to an additional abrupt increase in the number of computational operations;

- 3) the number of ANNs actor and critic increases by N_2/N_1 times, which leads to a linear increase in the required memory for storing the ANN weights actor and critic.

Taken together, these factors lead to a non-linear increase in the computational complexity of each training step.

4. In the analogous method, in the learning process, agents "get used" to each other's behavior, since the input data is an ordered tuple, where information about the state of the i -th agent is in the corresponding i -th position of the input data. By using identical copies of the ANN actor, the impersonality of agents is achieved — one of the prerequisites for scalability.

Results

The results of an experimental comparison of the original and improved MADDPG method are shown in Fig. 5–7 (see the second side of the cover). Fig. 5 shows graphs of the frequency of training steps execution on the same hardware for the original and improved MADDPG method with the number of agents being trained. $N = \{3; 5\}$. The jump in the frequency of training steps at the initial stage is explained by the accumulation of data in the retry buffer and the absence of an optimization operation for the ANN weights. The graphs show approximately equal frequency of learning steps for the original and improved method.

Fig. 6 (see the second side of the cover) shows graphs of learning curves — the dependence of the total reward received by the MAS during an episode on the number of learning steps for the number of agents being trained $N = \{3; 5\}$. As it follows from Fig. 6, the learning rate for the improved and original method is approximately equal.

Fig. 7 (see the second side of the cover) shows the average values of the total reward received by the trained MAS per episode for the original and improved MADDPG methods for various values of the number of K agents at the stage of functioning. For the original method, the results were obtained for $N \equiv K$. For the improved method, the results are given for various N .

As follows from the results, the efficiency of the functioning of the MAS trained using the improved method is comparable to the efficiency of the MAS trained using the original MADDPG method. In this case, using the improved method, it suffices to train the number of agents N less than the number of agents K at the stage of functioning for different values of K . For example, an MAS trained using the improved method for $N = 3$ for $K = \{5; 7\}$ demonstrates the same efficiency as the original method, which requires strict compliance $N \equiv K = 5$ or $N \equiv K = 7$.

Conclusion

In this paper, we propose an improved multi-agent reinforcement learning method based on the MADDPG deterministic policy gradient. The improved MADDPG method is based on the use of the concept of shared parameters and the introduction of artificial scoping for agents. The obtained results of experimental studies have confirmed the following theoretical expectations:

- 1) with an equal number of trained agents N , the computational complexity of the improved and original MADDPG methods are the same;
- 2) the efficiency of training using the improved method of N agents for an MAS of K agents for $K > N$ comparable to the learning efficiency with the original method of K agents.

The results obtained confirm the possibility of the improved MADDPG method working with a variable number of agents. In the future, the solutions proposed in this work can also be used to reduce the computational complexity of the original MADDPG method by reducing the number of trained agents N for a given number of K MAS agents.

References

1. Kovács G., Yussupova N., Rizvanov D. Resource management simulation using multi-agent approach and semantic constraints, *Pollack Period.*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 45–58.
2. Darintsev O., Migranov A. Task Distribution Module for a Team of Robots Based on Genetic Algorithms: Synthesis Methodology and Testing, *Proceedings of the 21st International*

Conference; Complex Systems: Control and Modeling Problems, CSCMP 2019, 2019, pp. 296–300.

3. Darintsev O. V. et al. Methods of a heterogeneous multi-agent robotic system group control, *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 150, pp. 687–694.
4. Wang L., Törngren M., Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, vol. 37, pp. 517–527.
5. Munasypov R. A., Masalimov K. A. Neural network models for diagnostics of complex technical objects state by example of electrochemical treatment process, *Proceedings of the 2nd International Ural Conference on Measurements, UralCon 2017*, 2017, pp. 156–160.
6. Bonilla Venegas F. V., Moya M. J., Litvin A., Lukyanov E., Marín Pillajo L. E. Modeling and Simulation of the Robot Mitsubishi RV-2JA controlled by electromyographic signals, *Enfoque UTE*, vol. 9 (2), pp. 208–222.
7. Vokhmintsev A. V., Melnikov A. V., Mironov K. V., Bur-lutsky V. V. Reconstruction of Three-Dimensional Maps Based on Closed-Form Solutions of the Variational Problem of Multisensor Data Registration, *Reports of the Academy of Sciences*, 2019, vol. 484, no. 6, pp. 672–677.
8. Bogdanov A., Dudorov E., Permyakov A., Pronin A., Kut-lubaev I. Control system of a manipulator of the anthropomorphic robot FEDOR, *Proceedings of the International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE*, 2019, pp. 449–454.
9. Petrenko V., Tebueva F., Antonov V., Untewsky N., Gurchinsky M. Energy-Efficient Path Planning: Designed Software Implementation, *Proceedings of the 21st International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2019)*, 2019, vol. 3, pp. 112–118.
10. Bogdanov M., Nasyrov D., Dumchikova I., Samigullin A. Processing of Biomedical Data with Machine Learning, *Proceedings of the 21st International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2019)*, 2019, vol. 3, pp. 6–16.
11. Petrenko V., Tebueva F., Gurchinsky M., Antonov V. A Robotic Complex Control Method Based on Deep Reinforcement Learning of Recurrent Neural Networks for Automatic Harvesting of Greenhouse Crops, *Proceedings of the 8th scientific Conference on Information Technologies For Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)*, 2020, vol. 174, pp. 340–346.
12. Petrenko V., Tebueva F., Antonov V., Gurchinsky M., Ry-abtsev S., Burianov A. Cooperative Motion Planning Method for Two Anthropomorphic Manipulators, *Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019)*, 2019, vol. 166, pp. 146–151.
13. Petrenko V., Tebueva F., Pavlov A., Antonov V., Kochanov M. Path Planning Method in the Formation of the Configuration of a Multifunctional Modular Robot Using a Swarm Control Strategy, *Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019)*, 2019, vol. 166, pp. 165–170.
14. Mnih V. et al. Human-level control through deep reinforcement learning, *Nature*, 2015, vol. 518, pp. 529–533.
15. Petrenko V., Tebueva F., Pavlov A., Svistunov N. Machine Learning Algorithm for Anthropomorphic Manipulator Control System, *Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)*, 2020, vol. 174, pp. 353–358.
16. Hernandez-Leal P., Kartal B., Taylor M. E. A survey and critique of multiagent deep reinforcement learning, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2019, vol. 33, pp. 750–797.
17. Pshikhopov V., Medvedev M., Medvedeva T. Terminal Motion Control of Multicopter Group, *Proceedings of the 4th International Conference on Control and Robotics Engineering, ICCRE 2019*, 2019, pp. 1–6.
18. Wang H., Zhao H., Ma D., Wei J. Cyber Physical System Framework for UAV Communications, *Electrical Engineering and Systems Science*, 2020, pp. 1–41.

19. **Yusupova N., Rizvanov D., Andrushko D.** Cyber-Physical Systems and Reliability Issues, *Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)*, 2020, vol. 174, pp. 133–137.
20. **Fabarisov T., Yusupova N., Ding K., Morozov A., Janschek K.** Model-based stochastic error propagation analysis for cyber-physical systems, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2020, vol. 17, no. 8, pp. 15–28.
21. **Valiev E., Yusupova N., Morozov A., Janschek K., Beyer M.** Evaluation of the Impact of Random Computing Hardware Faults on the Performance of Convolutional Neural Networks, *Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)*, 2020, vol. 174, pp. 307–312.
22. **Beyer M., Morozov A., Ding K., Ding S., and Janschek K.** Quantification of the impact of random hardware faults on safety-critical ai applications: Cnn-based traffic sign recognition case study, *Proceedings — 2019 IEEE 30th International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops, ISSREW 2019*, 2019, pp. 118–119.
23. **Lowe R., Wu Y., Tamar A., Harb J., Abbeel P., Mordatch I.** Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, vol. 2017-December, pp. 1–12.
24. **Foerster J., Nardelli N., Farquhar G., Afouras T., Torr P., Kohli P., Shimon Whiteson S.** Stabilising experience replay for deep multi-agent reinforcement learning, *ICML'17: Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, 2017, vol. 70, pp. 1146–1155.
25. **Gupta J. K., Egorov M., Kochenderfer M.** Cooperative Multi-agent Control Using Deep Reinforcement Learning, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10642 LNAI, pp. 1–9.
26. **Bloembergen D., Kaisers M., Tuyls K.** Lenient frequency adjusted Q-learning, *Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference*, 2010, pp. 19–26.
27. **Omidshafiei S., Pazis J., Amato C., How J. P., Vian J.** Deep decentralized multi-task multi-agent reinforcement learning under partial observability, *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning, ICML 2017*, 2017, vol. 6, pp. 4108–4122.
28. **Zheng Y., Jianye Hao J., Zhang Z.** Weighted double deep multiagent reinforcement learning in stochastic cooperative environments, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, vol. 11013 LNAI, pp. 1–8.
29. **Hong Z. W., Shih-Yang Su S. Y., Shann T. Y., Chang Y. H., Lee C. Y.** A deep policy inference Q-network for multi-agent systems, *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS*, 2018, vol. 2, pp. 1388–1396.
30. **Palmer G., Tuyls K., Bloembergen D., Savani R.** Lenient multi-agent deep reinforcement learning, *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS*, 2018, vol. 1, pp. 1–9.
31. **Matignon L., Laurent G. J., Le Fort-Piat N.** Hysteretic Q-Learning: An algorithm for decentralized reinforcement learning in cooperative multi-agent teams, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 1–7.
32. **Hausknecht M., Stone P.** Deep recurrent q-learning for partially observable MDPs, *AAAI Fall Symposium — Technical Report*, 2015, pp. 29–37.
33. **Matignon L., Laurent G. J., Le Fort-Piat N.** Independent reinforcement learners in cooperative Markov games: A survey regarding coordination problems, *Knowledge Engineering Review*, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 1–32.
34. **Tan M.** Multi-Agent Reinforcement Learning: Independent vs. Cooperative Agents, *Machine Learning Proceedings 1993*, 1993, pp. 1–8.
35. **Jaderberg M.** et al. Human-level performance in 3D multiplayer games with population-based reinforcement learning, *Science*, 2019, vol. 364, no. 6443, pp. 859–865.
36. **Espeholt L.** et al. IMPALA: Scalable Distributed Deep-RL with Importance Weighted Actor-Learner Architectures, *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, ICML 2018*, 2018, vol. 4, pp. 1–10.
37. **Lillicrap T. P.** et al. Continuous control with deep reinforcement learning, *Proceedings of the 4th International Conference on Learning Representations, ICLR 2016 — Conference Track Proceedings*, 2016, pp. 1–14.
38. **Foerster J. N., Assael Y. M., Nando de Freitas N., Whiteson S.** Learning to communicate with deep multi-agent reinforcement learning, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2016, pp. 1–9.
39. **Silver D., Lever G., Heess N., Degris T., Wierstra D., Riedmiller M.** Deterministic policy gradient algorithms, *Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, ICML 2014*, 2014, vol. 32, pp. 387–395.

Е. А. Марчук¹, аспирант, e.marchuk@innopolis.ru, Я. В. Калинин¹, канд. техн. наук, доц., jkv83@mail.ru,
А. В. Малолетов^{1,2}, д-р физ.-мат. наук, проф., a.maloletov@innopolis.ru,

¹Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис, г. Иннополис,

²Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Компенсация отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота по силам натяжения тросов*

Параллельные тросовые роботы обладают простотой конструкции и возможностью масштабируемости. Вместе с тем параллельные тросовые роботы сложны в проектировании в силу специфики определения области рабочего пространства тросового робота, проблемы столкновения тросов, а также геометрической и конструктивной нелинейности в математических моделях основных элементов робота. В настоящей работе рассматривается проблема исключения неопределенности, связанной с деформациями несущих элементов конструкции робота. Выбирается такая конфигурация тросовой системы, при которой точки схода некоторых тросов можно считать не отклоняющимися от заданного положения. Тросовая система крупногабаритного робота монтируется на несущих башнях. Отклонение точек схода верхних тросов, расположенных в верхней части башен, становится существенным вследствие значительной деформации верхней части башен. Деформацию башен в средней части можно считать незначительной, поэтому точки схода нижних тросов, расположенных не выше середины башни, можно считать соответствующими заданному положению. Ставится задача компенсации отклонения от заданного положения центра масс мобильной платформы тросового робота вследствие деформаций тросов и несущих башен. Также ставится задача компенсации отклонения в ориентации мобильной платформы. Обе задачи подразумевают неопределенность в отношении координат точек схода верхних тросов. Деформации тросов определяются из закона Гука с использованием датчиков сил натяжения тросов. Задача компенсации отклонений решается в два этапа. На первом этапе находится приближенное значение отклонения центра масс мобильной платформы по вертикальной координате, которая определяется как высота усеченной пирамиды, ребра которой образованы деформированными нижними тросами. На втором этапе определяются отклонения ориентации мобильной платформы и с использованием матрицы поворотов находятся отклонения по высоте точек крепления тросов в подвижной системе координат. В рассмотренных примерах используется ПИД регулирование, однако более совершенные методы автоматического управления, например, оптимальное регулирование, могут обеспечить лучшие результаты. Задачи рассматриваются на примере параллельного симметричного восьмитросового робота.

Ключевые слова: тросовый робот, отклонения, положение, ориентация, односторонняя связь

Параллельные тросовые роботы сочетают в себе простоту тросовых подъемных механизмов и эффективность современных систем автоматического управления. Устройство современных параллельных тросовых роботов во многом аналогично механизмам кабельных кранов, которые широко используются с конца XIX века [1]. Более того, подъемные механизмы, такие как лебедки, были хорошо известны в античном мире, и их конструкция не претерпела существенных изменений вплоть до наших дней [2]. Механизмы из прошлого отличаются от современных, главным образом, типом используемых источников энергии и от-

сутствием автоматического управления. Традиционные китайские и корейские подъемные краны, известные по гравюрам и описаниям XVII—XVIII веков, представляют собой механизмы с тросовым приводом, аналогичные современным тросовым роботам [3, 4]. Отличие от современных тросовых систем с электроприводом и автоматическим управлением состоит лишь в том, что приводились они в движение мускульной силой людей под руководством опытного человека.

Параллельные тросовые роботы стали использоваться в широком спектре практических задач только с начала XXI века. Одно из первых исследований параллельных роботизированных систем с тросовым приводом появилось в 80-х годах XX века [5]. В качестве

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 22-29-01618).

практического примера можно привести платформу Стюарта с тросовым приводом, которая использовалась для стабилизации крана морской платформы NIST Robocrane [6]. Начиная с 90-х годов XX века, были изготовлены многочисленные экспериментальные образцы параллельных тросовых роботов. Наиболее известными из них являются описанные в научных статьях и отчетах: FALCON, WARP, SEGESTA, IPANEMA, CableBOT, CoGiRo [7–12]. Параллельные тросовые роботы различаются особенностями механики (например, числом степеней свободы), управлением (например, оптимальное или нечеткое), эксплуатационными характеристиками (скорость и ускорение мобильной платформы), способностью перевозить полезную нагрузку различной массы, с разными линейными размерами (десятки сантиметров и десятки метров) и так далее [13].

Моделирование движения мобильной платформы как твердого тела описывается выражением

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + g_c = -w_p + A^T f, \quad (1)$$

где M — матрица масс; D — матрица затухания; q — вектор обобщенных координат; g_c — фактор воздействия центробежной и кориолисовой сил; w_p — динамический винт внешних сил; A^T — транспонированная матрица Якоби, представляющая собой матрицу смежности, которая связывает пространство обобщенных координат приводов и пространство обобщенных координат рабочего инструмента; f — вектор сил натяжений в тросах.

При использовании методов линейной алгебры необходимо знать точные координаты точек схода тросов с направляющих роликов на несущих башнях в неподвижной системе координат. Проблему представляет определение координат точек схода тросов с направляющих роликов с учетом деформаций башен. Представление башни как балки Эйлера—Бернулли с консольной заделкой при невысоких вычислительных затратах дает слишком грубое приближение, а более точное конечно-элементное представление башни или мачты предполагает высокие вычислительные затраты. В инженерных расчетах тросов наиболее распространено моделирование деформаций в соответствии с теорией тяжелой гибкой нити [14, 15]. Конечно-элементное представление тросов также используется в некоторых инженерных задачах, однако

практически не применяется в моделировании тросовых роботов. В моделировании тросовых роботов часто используются более простые способы представления тросов, например, как эластичных стержней с включением условия односторонней связи [16, 17]. Наиболее полные описания принципов устройства параллельных тросовых роботов, а также методики их проектирования приведены в работах [18, 19].

Проблема деформации элементов тросового робота

В процессе работы параллельного тросового робота в силу деформаций как самих тросов, так и несущих элементов возникают отклонения мобильной платформы от заданного положения. При небольших линейных размерах робота, порядка нескольких метров, несущая конструкция может выполняться в виде пространственного многогранника, обладающего достаточной жесткостью. В таком случае деформации несущих элементов можно считать несущественными. Также при относительно небольшой массе полезной нагрузки на мобильной платформе (порядка нескольких килограммов) деформации тросов могут считаться пренебрежимо малыми. Скорости и ускорения центра масс мобильной платформы параллельных тросовых роботов при движении в большинстве практических задач невелики и, как правило, не превышают 1 м/с и 1 м/с² соответственно. При проектировании крупногабаритных параллельных тросовых роботов с линейными размерами порядка десятков метров и полезной нагрузке порядка нескольких сотен или тысяч килограмм несущая конструкция может выполняться в виде башен или мачт (рис. 1, см. третью сторону обложки). Отклонения верхней части башни или мачты в силу деформаций под воздействием изгибающих нагрузок становятся значительными. В случае жесткой несущей конструкции отклонение мобильной платформы от заданного положения обусловлено только деформацией тросов и может быть с достаточной точностью определено из закона Гука по показаниям датчиков сил натяжения тросов.

В случаях использования в конструкции робота башен или мачт точное отклонение точки схода троса в верхней части опоры определить затруднительно. К деформации троса

добавляется неизвестная величина, вызванная отклонением точки схода троса. Появляется фактор неопределенности. Определить точное положение мобильной платформы робота исходя только из показаний датчиков сил натяжения тросов и, соответственно, длин тросов становится невозможно. Для определения положения мобильной платформы робота в неподвижной системе координат могут использоваться методы непосредственного измерения положения, такие как: оптические устройства (лазерный дальномер, лазерный трекер), радиопеленг, эхолокация, компьютерное зрение [20, 21]. Перечисленные методы показывают хорошие результаты в лабораторных условиях, однако не всегда подходят для использования в промышленной робототехнике. К примеру, одним из перспективных направлений применения крупногабаритных параллельных тросовых роботов является использование их в качестве основы строительного 3D-принтера. В условиях строительной площадки из-за наличия загрязнений постоянное использование оптических датчиков и компьютерного зрения видится затруднительным, а использование прочих высокоточных измерительных средств представляется экономически необоснованным.

Заметим, что значение отклонения точки схода троса от заданного положения на уровне не выше середины высоты башни или мачты вследствие деформации существенно меньше, чем отклонение точки схода троса на вершине башни или мачты. В таком случае точки схода нижних тросов можно считать находящимися в заданном положении, и при определенной конфигурации тросовой системы становится возможным приближенное определение отклонения центра масс мобильной платформы по вертикальной координате на основании показаний датчиков сил натяжения только нижних тросов.

Ставится задача управления положением мобильной платформы параллельного тросового робота с помощью обратной связи, построенной на базе датчиков усилий в тросах и наклона тросов относительно платформы, без применения средств измерения координат платформы. В исследовании рассматривается двухэтапный метод компенсации вертикальных отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота от заданного программного движения.

Описание расчетной модели тросового робота

Рассматривается тросовая система, в которой направляющие ролики нижних тросов закреплены на подвижных каретках, перемещающихся вертикально вдоль опор, и система управления обеспечивает согласованное перемещение кареток таким образом, чтобы точки схода всех четырех нижних тросов образовывали горизонтальную плоскость на высоте желаемого положения мобильной платформы.

На мобильной платформе тросы закреплены таким образом, что верхние тросы крепятся к верхней части платформы, а нижние — к нижней. Такая конфигурация тросов при заданной ориентации мобильной платформы с нулевыми углами Эйлера гарантированно исключает проблему столкновения тросов в процессе перемещения платформы в рабочем пространстве робота.

При этом платформа фактически висит на верхних тросах, длины которых обеспечивают управление положением платформы, в то время как нижние тросы обеспечивают только сохранение ориентации платформы.

Для обозначенной конфигурации тросовой системы робота и ориентации мобильной платформы ее положение в случае нерастяжимых тросов однозначно определяется длинами четырех нижних тросов, лежащих в одной плоскости. При рассмотрении задачи с учетом растяжимости тросов однозначность теряется, и могут иметь место два симметричных случая: центр масс платформы находится выше или ниже уровня заданного положения. Следует заметить, что в случае высоконагруженного тросового робота допустимо считать тросы растяжимыми стержнями. Принимается, что полезная нагрузка обеспечивает сильное натяжение тросов, и, таким образом, исключается геометрическая нелинейность тросов. Условие конструктивной нелинейности тросов сохраняется.

В таком случае для определения положения центра масс мобильной платформы робота необходимо оборудовать четыре нижних троса датчиками натяжения и датчиками угла наклона. Датчики натяжения тросов позволяют найти удлинение каждого троса из закона Гука. Датчики угла наклона тросов позволяют определить восходящее или нисходящее направление тросов. Таким образом, для решения поставленной задачи робот должен быть оборудован датчиками натяжения нижних

тросов, датчиками угла наклона нижних тросов, а также гироскопом, определяющим ориентацию мобильной платформы.

Линейные размеры робота в расчетной модели составляют 15...20 м. Тросы из высокомолекулярного полиэтилена Dauphine имеют площадь поперечного сечения $1,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Отклонения точек схода верхних тросов от заданного положения заданы произвольным образом и изменяются в диапазоне $1...3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. По истечении первых 60 с, в течение которых происходит затухание колебаний твердого тела, закрепленного на тросовой системе и лишенного опоры, начинается движение по заданной траектории. Мобильная платформа робота движется по пространственной криволинейной траектории со скоростью не более 0,15 м/с. Масса мобильной платформы с полезной нагрузкой составляет 1200 кг.

Компенсация отклонения по высоте

Первый этап решения задачи предполагает вывод центра масс мобильной платформы на заданный уровень высоты. В процессе движения платформа отклоняется от заданного желаемого уровня (рис. 2), причем отклонение может произойти как вниз, если верхние тросы будут длиннее требуемого, так и вверх, если верхние тросы окажутся короче требуемого. В этом случае четыре нижних троса образуют боковые ребра усеченной пирамиды, большее основание которой образовано точками схода нижних тросов, а меньшее основание образовано точками крепления тросов к платформе. В общем случае основания усеченной пирамиды могут быть произвольными четырехугольниками, но, не теряя общности, можно ограничиться рассмотрением прямоугольных оснований со сторонами a , b и c , d .

Строго говоря, после деформации тросов получается неправильная усеченная пирамида, а ее боковые грани являются выпуклыми четырехугольниками. Однако с учетом относительно небольшого удлинения тросов отклонениями платформы от заданной ориентации можно пренебречь и считать боковые грани трапециями.

Для определения отклонения центра платформы по высоте от уровня желаемого положения решается следующая геометрическая задача. Сначала, полагая длины тросов известными, определяются высоты трапеций двух любых противоположных боковых граней усеченной пирамиды:

$$h_1 = \sqrt{l_4^{*2} - \left(\frac{(d-a)^2 + l_4^{*2} - l_1^{*2}}{2(d-a)} \right)^2}; \quad (2)$$

$$h_2 = \sqrt{l_3^{*2} - \left(\frac{(d-a)^2 + l_3^{*2} - l_2^{*2}}{2(d-a)} \right)^2}, \quad (3)$$

где l_1^* , l_2^* , l_3^* , l_4^* — длины деформированных нижних тросов, определенные на основании показаний датчиков усилий и известных параметров тросов; a — расстояние между двумя соседними точками крепления нижних тросов к мобильной платформе; d — расстояние между двумя соседними точками схода нижних тросов с опорных башен.

Далее строится третья трапеция, так чтобы ее малое основание лежало в плоскости нижней грани мобильной платформы параллельно сторонам a , а боковые стороны были образованы найденными высотами рассмотренных выше трапеций. Тогда отклонение центра платформы по высоте от уровня программного положения определяется выражением

$$h = \sqrt{h_2^2 - \left(\frac{(c-b)^2 + h_2^2 - h_1^2}{2(c-b)} \right)^2}, \quad (4)$$

где b — расстояние между двумя соседними точками крепления нижних тросов к мобильной платформе; c — расстояние между двумя соседними точками схода нижних тросов с опорных башен.

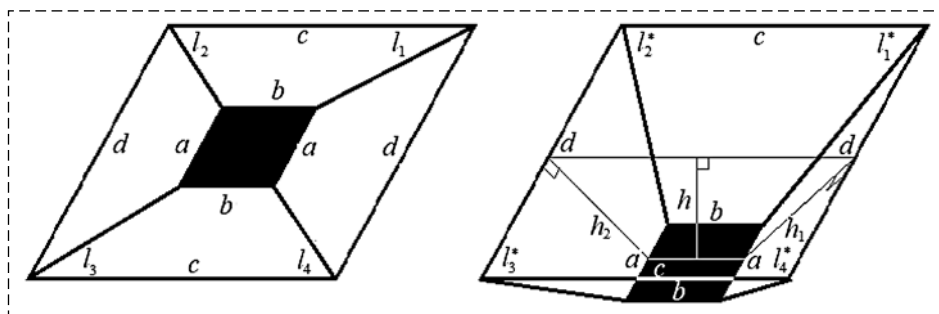


Рис. 2. Геометрия нижних тросов без нагрузки (плоскость) и под нагрузкой (усеченная пирамида)

Fig. 2. Geometry of lower cables without loading (plane) and with loading (frustum)

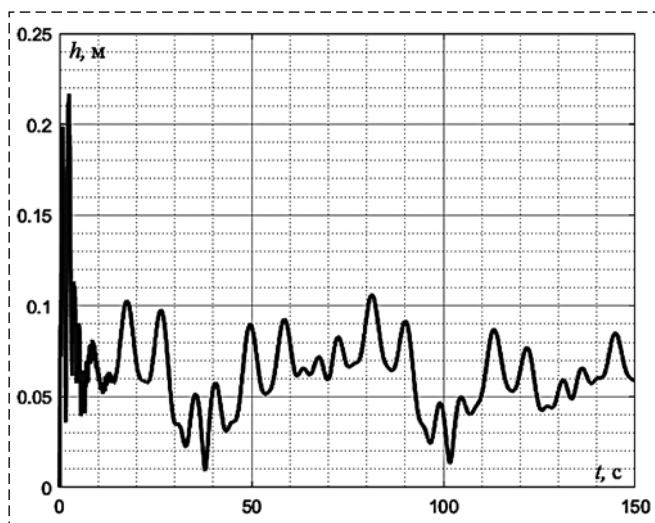


Рис. 3. Определение отклонения мобильной платформы по высоте от заданного программного движения. Первый этап
Fig. 3. Computation of height error. The first stage

Основным источником ошибок при определении отклонений таким способом в реальном роботе может стать шум в показаниях датчика усилий, на основании которых вычисляются длины тросов. Однако в теоретической модели предполагается, что шум в этих показаниях эффективно фильтруется. В качестве примера на рис. 3 показан результат численного моделирования при программном движении платформы по некоторой траектории в горизонтальной плоскости.

Найденное значение всегда неотрицательно, и для регулирования относительно нулевого уровня заданного положения необходимо определить знаки участков полученной кривой. Предлагается определять превышение или занижение относительно заданного уровня высоты центра масс платформы с использованием показаний датчиков угла наклона нижних тросов. Для определения знака можно использовать функцию sign . Тогда знак отклонения вычисляется согласно выражениям

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i; \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \text{sign}(\alpha), \quad (6)$$

где α_i — угол наклона нижнего троса к горизонтальной плоскости.

Предложенный алгоритм определения знака функции h как знака алгебраической суммы углов работает достаточно адекватно. Недостатками является негладкость и неплавность функции sign . Предложенный способ оценки

знака имеет нечувствительность к значениям отклонения, близким к нулю, что приводит к дрейзу на начальном этапе неустановившегося движения, для которого характерны высокочастотные колебания платформы. Однако это не является проблемой, так как в случае неустановившегося движения задача компенсации отклонений не актуальна.

В целях сглаживания функции знака вместо функции sign можно использовать сигмоидальную единичную ступенчатую функцию активации, в которой $\sigma(\alpha) \in (-1, 1)$:

$$\sigma(\alpha) = \frac{2}{1 + e^{-k(\alpha - c)}} - 1, \quad (7)$$

где k, c — некоторые постоянные коэффициенты.

Результат моделирования приведен на рис. 4 (см. третью сторону обложки). Как можно видеть, предложенный алгоритм определения знака функции h как знака алгебраической суммы углов работает адекватно и с сигмоидальной функцией, которая обеспечивает гладкость полученной зависимости в установившемся режиме движения.

Окончательно значение отклонения по высоте с учетом знака определяется выражениями:

$$h = f(l_1^*, l_2^*, l_3^*, l_4^*); \quad (8)$$

$$\Delta h = h\sigma(\alpha). \quad (9)$$

Результат моделирования приведен на рис. 5 (см. третью сторону обложки). Полученные значения являются приближенными, поскольку значительные отклонения центра масс платформы в проекции на горизонтальную плоскость будут увеличивать погрешность определения уровня отклонения по высоте с использованием предложенного метода трапеций. Вместе с тем, по мере уменьшения значения отклонения в процессе регулирования погрешность будет уменьшаться (рис. 6, см. третью сторону обложки). Подтяжка верхних тросов на первом этапе может осуществляться, например, синхронным ПИД регулированием длин верхних тросов с минимизацией отклонения центра масс платформы по высоте от заданного уровня.

Предлагаемый метод может быть также обобщен на тросовые роботы с нисходящим направлением нижних тросов, а также с большим или меньшим числом тросов. Необходимым условием применимости метода является условие соответствия положения точек схода нижних тросов заданному положению. В подобных случаях

сначала следует определять высоту усеченной фигуры для заданного положения, затем высоту усеченной фигуры для деформированных тросов и после находить разность их высот. Алгоритм определения знака функции h как знака алгебраической суммы углов наклона нижних тросов также будет несколько отличаться, но без принципиальных изменений.

По результатам компьютерного моделирования предложенный метод в комбинации с ПИД регулированием обеспечивает погрешность отклонения по высоте не более $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, при отклонении в отсутствие регулирования — до $-5 \cdot 10^{-2}$ м и сохраняющихся значениях отклонений в проекции на горизонтальную плоскость — до $\pm 5 \cdot 10^{-2}$ м (рис. 7 и 8, см. третью сторону обложки).

Компенсация отклонений ориентации

Второй этап задачи предполагает минимизацию отклонений ориентации твердого тела от заданных значений. Рассмотренный выше метод позволяет вывести центр масс тела на заданный уровень, почти не оказывая влияние на его ориентацию. Для управления ориентацией мобильной платформы тросового робота необходимо оборудовать платформу трехосевым гироскопом и с использованием матрицы поворотов найти вертикальную координату z_b^* каждой из точек крепления нижних тросов относительно подвижной системы координат:

$$\begin{bmatrix} x_b^* \\ y_b^* \\ z_b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\varphi) + s(\psi)s(\theta)s(\varphi) & -c(\psi)s(\varphi) + s(\psi)s(\theta)c(\varphi) & s(\psi)c(\theta) \\ c(\theta)s(\varphi) & c(\theta)c(\varphi) & -s(\varphi) \\ -s(\psi)c(\varphi) + c(\psi)s(\theta)s(\varphi) & s(\psi)s(\varphi) + c(\psi)s(\theta)c(\varphi) & c(\psi)c(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где x_b, y_b, z_b — координаты i -й точки крепления нижнего троса к мобильной платформе робота; θ, ψ, φ — углы поворотов платформы; $c(\theta) = \cos(\theta)$, $s(\theta) = \sin(\theta)$ и т. д. В формуле (10) в качестве углов поворота использованы корабельные углы. Их применение оправдано тем, что такой набор углов не вырождается при сохранении горизонтальной ориентации платформы.

Подтяжка верхних тросов на втором этапе может осуществляться ПИД регулированием длины каждого из верхних тросов с минимизацией отклонения каждой точки крепления нижнего троса по высоте от заданного

уровня в подвижной системе координат. Таким образом, нижняя плоскость мобильной платформы приводится к заданному горизонтальному положению. Повороты вокруг вертикальной оси платформы в данном примере не рассматриваются ввиду их малости и несущественности, что, в свою очередь, связано с выбранной конфигурацией тросовой системы.

По результатам компьютерного моделирования видно, что после применения компенсирующих воздействий отклонения в проекции на горизонтальную плоскость не превышают $\pm 2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Погрешность отклонения по высоте составляет не более $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ м после применения компенсирующего воздействия вместе с компенсацией отклонений ориентации. Для практического использования крупногабаритного параллельного тросового робота в качестве основы строительного 3D-принтера отклонения в горизонтальной плоскости в $\pm 2,5 \cdot 10^{-2}$ м и отклонения по вертикальной координате в $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ м можно считать допустимыми.

В дальнейших исследованиях представляется предпочтительным введение системы оптимального регулирования вместо ПИД регуляторов. Также следует уделить внимание робастному управлению тросовой системой робота, поскольку стабильность управления тросовой системой является критически важной при промышленном использовании робота.

Список литературы

1. Samset I. Winch and cable systems. Springer Netherlands, 1985. 534 p.
2. McNeil I. An Encyclopaedia of the history of technology. Routledge, 1996. 1084 p.
3. Kim P. W. Scientific Disciplines of Geojunggi (the Traditional Crane) in Korean Science, Technology and History Class // EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education. 2017. Iss. 13(9). P. 6147—6163.
4. Gujin Tushu Jicheng. Imperial Encyclopaedia — Manufacture. Vol. 800 (1700—1725). Taiwan, 1977. 121 p.
5. Landsberger S. E. Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator. Massachusetts Institute of Technology, 1984.
6. Albus J. S. Cable arrangement and lifting platform for stabilized load lifting US Patent No. 4 883 184, Nov. 28, 1989.

7. Kawamura S., Choe W., Tanaka S., Pandian S. R. Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1995. Vol. 1. P. 215–220.
8. Maeda K., Tadokoro S., Takamori T., Hiller M., Verhoeven R. On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator // Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1999. Vol. 2. P. 895–900.
9. Bruckmann T., Pott A., Hiller M. Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms // Advances in Robot Kinematics. 2006. P. 403–412.
10. Pott A., M. therich H., Kraus W., Schmidt V., Miermeister P., Verl A. IPAnema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications // Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science. 2012. Vol. 12. P. 19–34.
11. Rodriguez M. Parallel Cable Robotics for Improving Maintenance and Logistics of Large-Scale Products. Tecnalia, 2013.
12. Tempel P., Herve P., Tempier O., Gouttefarde M., Pott A. Estimating inertial parameters of suspended cable-driven parallel robots — Use case on CoGiRo // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. P. 6093–6098.
13. Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A. Mathematical Modeling of Eight-Cable-Driven Parallel Robot // 2021 International Conference "Nonlinearity, Information and Robotics" (NIR). 2021. P. 1–5.
14. Irvine. H. M. Cable structures. The MIT Press, 1981. 259 p.
15. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.
16. Kalinin Ya.V., Marchuk E. A. Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. Vol. 22, N. 10. 2021. P. 547–552.
17. Maloletov A. V., Fadeev M. Y., Klimchik A. S. Error Analysis in Solving the Inverse Problem of the Cable-Driven Parallel Underactuated Robot Kinematics and Methods for Their Elimination // IFAC-PapersOnLine. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019. 2019. P. 1156–1161.
18. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots. Springer International Publishing, 2018. 465 p.
19. Zi B., Qian S. Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications. Springer Singapore, 2017. 299 p.
20. Boby R. A., Maloletov A., Klimchik A. Measurement of End-effector Pose Errors and the Cable Profile of Cable-Driven Robot using Monocular Camera // Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. 2021. Iss. 103 (2). P. 32.
21. Akhmetzyanov A., Rassabin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A. Model Free Error Compensation for Cable-Driven Robot Based on Deep Learning with Sim2real Transfer Learning // Lecture Notes in Electrical Engineering, 793. 2022. P. 479–496.

Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement

E. A. Marchuk, e.marchuk@innopolis.ru, **Ya. V. Kalinin**, jkv83@mail.ru, **A. V. Maloletov**, a.maloletov@innopolis.ru,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation,
Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

*Corresponding author: Maloletov A. V., Dr. Sc., Professor,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation, e-mail: a.maloletov@innopolis.ru*

Accepted on June 28, 2022

Abstract

The paper deals with a problem of position and orientation errors of mobile platform of large-sized parallel cable-driven robots. The advantages of parallel cable-driven robots are simplicity of structure and scalability. At the same time, parallel cable-driven robots are difficult to design due to the specific problems such as collision of cables, geometric and structural nonlinearity in the mathematical models of the main elements of the robot. In this paper, we consider the problem of eliminating the uncertainty associated with deformations of the elements of the robot structure. Such a configuration of the cable system is selected, in which the proximal anchor points of some cables can be considered without errors relatively to given positions. The cable system of a large-sized robot is mounted on the towers. The errors in the proximal anchor points relatively to given positions become significant due to the significant deformations of upper sections of the towers. The deformations of the towers in lower sections can be considered insignificant, and the proximal anchor points have to be located no higher than the middle of the tower to be considered corresponding to a given position. The aim is to compensate the position and orientation errors of the mobile platform of large-sized parallel cable-driven robot due to deformations of the cables and towers. The task suppose uncertainty about the coordinates of the proximal anchor points of the upper cables. Cable deformations are determined from Hooke's law using tensile forces measurement in cables. The problem of compensations is solved in two stages. At the first stage, the approximate bias of the center of mass of the mobile platform along the vertical coordinate is found. It is defined as the height of the truncated pyramid, the edges of which are formed by stretched lower cables. At the second stage, rotation angles of the mobile platform are determined. Using the rotation matrix, biases in the heights of each distal anchor points are found in the tool coordinate system. In the studied cases PID regulation is used, however, more advanced techniques of automatic regulation, for example, optimal control, can provide better results. The tasks are applied to the model of large-sized symmetric parallel eight-cable-driven robot.

Keywords: cable-driven robot, position, orientation, errors, tensometer

For citation:

Marchuk E. A., Kalinin Ya.V., Maloletov A. V. Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 515–522.

DOI: 10.17587/mau.23.515-522

References

1. **Samset I.** Winch and cable systems, Springer Netherlands, 1985, 534 p.
2. **McNeil I.** An Encyclopaedia of the history of technology, Routledge, 1996, 1084 p.
3. **Kim P. W.** Scientific Disciplines of Geojunggi (the Traditional Crane) in Korean Science, Technology and History Class, *EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education*, 2017, iss. 13(9), pp. 6147–6163.
4. **Gujin Tushu Jicheng.** Imperial Encyclopaedia — Manufacture, vol. 800 (1700–1725), Taiwan, 1977, 121 p.
5. **Landsberger S. E.** Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator, Massachusetts Institute of Technology, 1984.
6. **Albus J. S.** Cable arrangement and lifting platform for stabilized load lifting US Patent No. 4 883 184, Nov. 28, 1989.
7. **Kawamura S., Choe W., Tanaka S., Pandian S. R.** Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system, *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, vol. 1, pp. 215–220.
8. **Maeda K., Tadokoro S., Takamori T., Hiller M., Verhoeven R.** On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator, *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, vol. 2, pp. 895–900.
9. **Bruckmann T., Pott A., Hiller M.** Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms, *Advances in Robot Kinematics*, 2006, pp. 403–412.
10. **Pott A., Metherich H., Kraus W., Schmidt V., Miermeister P., Verl A.** IPAnema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications, *Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science*, 2012, vol. 12, pp. 19–34.
11. **Rodriguez M.** Parallel Cable Robotics for Improving Maintenance and Logistics of Large-Scale Products, Tecnalia, 2013.
12. **Tempel P., Herve P., Tempier O., Gouttefarde M., Pott A.** Estimating inertial parameters of suspended cable-driven parallel robots — Use case on CoGiRo, *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 6093–6098.
13. **Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A.** Mathematical Modeling of Eight-Cable-Driven Parallel Robot, *2021 International Conference "Nonlinearity, Information and Robotics" (NIR)*, 2021, pp. 1–5.
14. **Irvine H. M.** Cable structures, The MIT Press, 1981, 259 p.
15. **Merkin D. R.** Vvedenie v mehaniku gibkoy niti (Introduction to the mechanics of a flexible thread), Moscow, Nauka, 1980, 240 p. (in Russian).
16. **Kalinin Ya. V., Marchuk E. A.** Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 547–552 (in Russian).
17. **Maloletov A. V., Fadeev M. Y., Klimchik A. S.** Error Analysis in Solving the Inverse Problem of the Cable-Driven Parallel Underactuated Robot Kinematics and Methods for Their Elimination, *IFAC-PapersOnLine. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019*, 2019, pp. 1156–1161.
18. **Pott A.** Cable-Driven Parallel Robots, Springer International Publishing, 2018, 465 p.
19. **Zi B., Qian S.** Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications, Springer Singapore, 2017, 299 p.
20. **Boby R. A., Maloletov A., Klimchik A.** Measurement of End-effector Pose Errors and the Cable Profile of Cable-Driven Robot using Monocular Camera, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2021, iss. 103 (2), pp. 32.
21. **Akhmetzyanov A., Rassabin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A.** Model Free Error Compensation for Cable-Driven Robot Based on Deep Learning with Sim2real Transfer Learning, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 793, 2022, pp. 479–496.



15th International Conference "Intelligent Systems" (INTELS'22) December 14–16, 2022 Moscow, Russia

www.intels-conf.ru
e-mail: org@intels-conf.ru



Federal Research Center "Computer Science and Control" of the RAS,
Ivannikov Institute for System Programming of the RAS, Lomonosov Moscow State University,
St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", and Bauman Moscow State Technical University
invite you to participate in the 15th International Conference "Intelligent Systems – 2022" (INTELS'22),
that will take place in **Moscow, Russia, December 14–16, 2022.**



Topics of interest include but not limited to

Logic inference and many-valued logic
Intelligent and AI-based control
Optimal control
Optimization
Artificial neural networks
Fuzzy systems
Machine Learning
Symbolic regression and genetic programming
Patterns recognition
Evolutionary computations
Bionic systems
Cognitive systems
Brain-machine interface systems
Identification of dynamical plants
Intelligent aerospace systems
Intelligent systems
in bioinformatics

Adaptive Security Architecture for intelligent systems
Autonomous Agents and Things
Big Data Analysis
Data mining: WEB mining, image mining
Deep Learning
Design and implementation of interdisciplinary systems
for computer mathematics
Computer algebra and symbolic computation in
theorem proving systems
Knowledge representation and automated reasoning
Decision support systems
Multi-agent systems
Swarm intelligence in robotics
Intelligent systems in robotics

И. П. Попов, старший преподаватель, ip.porow@yandex.ru,
Курганский государственный университет, г. Курган

Стабилизированный ротатор для мехатронных автоматических систем

Целью работы является нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором. Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к стабилизированному ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии, а именно, груз и пружина. Собственная частота вращения стабилизированного ротатора строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами. При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом не меняется и равна собственной). Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равномерно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, может развиваться как сжатие, так и растяжение пружины. Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза и равную ему начальную деформацию пружины. Подобно тому, как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения. При нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение. Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом качестве он может иметь сильную конкуренцию со стороны мехатронных систем. Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

Ключевые слова: ротатор, маятник, частота, стабилизация, выбег, энергия, момент импульса, циклотронное движение

Введение

Механические и электромагнитные явления и процессы во многих случаях математически изоморфны [1–3]. Это дает возможность обобщать достижения одной научной специальности на другую. В этом смысле представляет интерес циклотронное движение электрического заряда, которое характеризуется *фиксированной частотой вращения*. Это следует из баланса сил:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \frac{qB}{m}r = \omega r \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m}.$$

Здесь q — электрический заряд, v — тангенциальная скорость заряда, B — магнитная индукция, m — масса заряженной частицы, r — радиус циклотронного движения, ω — частота вращения.

Частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Ключевым обстоятельством для возможности обобщения циклотронного движения на механику является тот факт, что лагранжиан электрона, движущегося поперек постоянного

магнитного поля, вдвое больше его кинетической энергии:

$$L = \frac{mv^2}{2} + e(\mathbf{v}, \mathbf{A}).$$

Векторный потенциал магнитного поля равен

$$A = \frac{1}{2}[\mathbf{B}, \mathbf{r}].$$

При этом $\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}]$. Таким образом,

$$L = \frac{mv^2}{2} + \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}.$$

Второе слагаемое равно

$$\frac{q^2 B^2 r^2}{2m} = \frac{q^2 B^2}{2m} \frac{m^2 v^2}{q^2 B^2} = \frac{mv^2}{2}.$$

Тогда

$$L = 2 \frac{mv^2}{2}.$$

Целью работы является нахождение механического аналога циклотронного движения

и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать *стабилизированным ротатором*.

Тема стабилизации вращений актуальна в автоматизированных системах [4–8].

Синтез стабилизированного ротатора

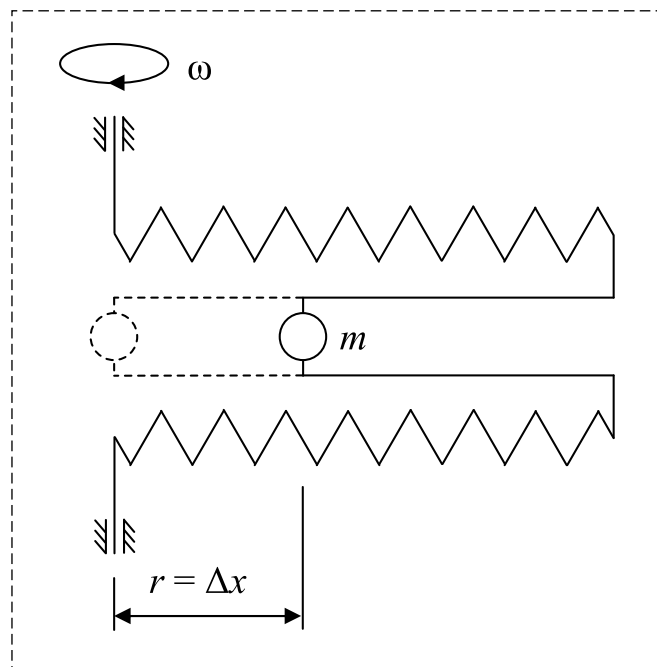
Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику и заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к стабилизированному ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии, а именно, *груз* (массой m) и *пружина* (с коэффициентом упругости k).

В соответствии с характером циклотронного движения и, соответственно, ротатора необходимо имеет место *радиус* вращения (r) и *циклическая частота* (ω).

Из равенства энергий следует

$$\frac{k(\Delta x)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr^2\omega^2}{2} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\Delta x}{r}.$$

Здесь Δx — абсолютная деформация пружины.



Стабилизированный ротатор
Stabilized rotator

Неизменность циклической частоты обеспечивается очевидным ключевым условием

$$\Delta x = r.$$

Установленные необходимые обстоятельства определяют принципиальную схему стабилизированного ротатора, которая представлена на рисунке.

Собственная частота вращения стабилизированного ротатора

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой *колебаний* маятника с идентичными параметрами [9].

Кинематика стабилизированного ротатора

Момент импульса стабилизированного ротатора равен

$$L = J\omega_0 = mr^2\omega_0 = mr^2\sqrt{\frac{k}{m}} = r^2\sqrt{mk}.$$

Здесь J — момент инерции; $x_\omega = \sqrt{mk}$ — волновой реактанс [10].

$$r = \frac{v}{\omega_0},$$

тогда

$$L = r^2x_\omega = \frac{v^2}{\omega_0^2}x_\omega = v^2\frac{m}{k}\sqrt{mk} = \frac{m}{\omega_0}v^2.$$

При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом не меняется и равна собственной).

Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равновероятно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, может развиваться как сжатие, так и растяжение пружины.

Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза r_0 и равную ему начальную деформацию пружины.

Динамика стабилизированного ротатора

При раскручивании преднапряженного ротатора до частоты ω_0 центробежная сила $m\omega^2 r$ меньше силы начальной деформации пружины kr_0 , поэтому радиус r_0 не изменяется. Это участок линейной динамики $[0, \omega_0]$

$$r = r_0, \quad \omega = \frac{M}{mr_0^2} t.$$

За время t_0 при постоянном вращающем моменте M ротатор достигнет частоты вращения ω_0 :

$$t_0 = \frac{\omega_0 mr_0^2}{M} = \frac{\sqrt{mkr_0^2}}{M} = \frac{L_0}{M}.$$

При дальнейшем нагружении стабилизированного ротатора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений — вращательного и поступательного (радиального):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} = \frac{M}{mr^2}; \\ m \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{mv^2}{r} - kr = \frac{m\omega^2 r^2}{r} - kr = (m\omega^2 - k)r. \end{cases}$$

Трение здесь не учитывается.

Начальные условия:

$$\omega|_{t=t_0} = \omega_0, \quad r|_{t=t_0} = r_0, \quad \frac{dr}{dt}\bigg|_{t=t_0} = 0.$$

Из системы уравнений и начальных условий следует

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt}\bigg|_{t=t_0} &= \frac{M}{mr_0^2}; \\ \frac{d^2 \omega}{dt^2} &= -2 \frac{M}{mr^3} \frac{dr}{dt}, \quad \frac{d^2 \omega}{dt^2}\bigg|_{t=t_0} = 0; \\ \frac{d^2 r}{dt^2} &= (\omega^2 - \omega_0^2)r, \quad \frac{d^2 r}{dt^2}\bigg|_{t=t_0} = 0; \\ \frac{d^3 r}{dt^3} &= 2\omega \frac{d\omega}{dt} r + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{dr}{dt}; \\ \frac{d^3 r}{dt^3}\bigg|_{t=t_0} &= 2\omega_0 \frac{M}{mr_0^2} r_0 = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0}; \end{aligned}$$

$$\frac{d^3 \omega}{dt^3} = 6 \frac{M}{mr^4} \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - 2 \frac{M}{mr^3} \frac{d^2 r}{dt^2}, \quad \frac{d^3 \omega}{dt^3}\bigg|_{t=t_0} = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 \omega}{dt^4} &= -24 \frac{M}{mr^5} \left(\frac{dr}{dt}\right)^3 + 6 \frac{M}{mr^4} 2 \frac{dr}{dt} \frac{d^2 r}{dt^2} + \\ &+ 6 \frac{M}{mr^4} \frac{dr}{dt} \frac{d^2 r}{dt^2} - 2 \frac{M}{mr^3} \frac{d^3 r}{dt^3}; \end{aligned}$$

$$\frac{d^4 \omega}{dt^4}\bigg|_{t=t_0} = -2 \frac{M}{mr_0^3} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} = -4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4};$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 r}{dt^4} &= 2 \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 r + 2\omega \frac{d^2 \omega}{dt^2} r + 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + \\ &+ 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{d^2 r}{dt^2}; \end{aligned}$$

$$\frac{d^4 r}{dt^4}\bigg|_{t=t_0} = 2 \left(\frac{M}{mr_0^2}\right)^2 r = \frac{2M^2}{m^2 r_0^3}.$$

Таким образом, частота вращения стабилизированного ротатора и радиус представимы в виде

$$\begin{aligned} \omega &\approx \frac{1}{0!} \omega(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{d\omega}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2 \omega}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3 \omega}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4 \omega}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t + \frac{1}{2!} 0t^2 + \frac{1}{3!} 0t^3 - \frac{1}{4!} 4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4} t^4 + \\ &+ \dots = \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t - \frac{\omega_0 M^2}{6m^2 r_0^4} t^4 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r &\approx \frac{1}{0!} r(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{dr}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2 r}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3 r}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4 r}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= r_0 + 0t + \frac{1}{2!} 0t^2 + \frac{1}{3!} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} t^3 + \frac{1}{4!} \frac{2M^2}{m^2 r_0^3} t^4 + \\ &+ \dots = r_0 + \frac{\omega_0 M}{3mr_0} t^3 + \frac{M^2}{12m^2 r_0^3} t^4 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Вопрос о сходимости рядов здесь не рассматривается.

Смысл последних двух уравнений состоит в иллюстрации нелинейности динамики стабилизированного ротатора при нагружении его постоянным вращающим (тормозящим) моментом.

Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой [11–15], частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

Из соотношения (2) следует, что чем меньше момент M и больше m и r_0 , тем меньше отклонение частоты вращения ω от собственной ω_0 .

Второе замечательное свойство стабилизированного ротатора

(Первым является фиксированная собственная частота вращения (1) и ее совпадение с собственной частотой колебаний маятника.)

При *вынужденном* вращении стабилизированного ротатора с постоянной частотой

$$\omega = a\omega_0$$

(a — безразмерный коэффициент) его радиальная динамика определяется уравнением

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \left(\omega^2 - \frac{k}{m} \right) r = (a^2 \omega_0^2 - \omega_0^2) r = -(1 - a^2) \omega_0^2 r.$$

В зависимости от значения a возможны три варианта.

1. При $a < 1$ имеет место дифференциальное уравнение свободных гармонических незатухающих колебаний с собственной частотой

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1 - a^2}.$$

Таким образом, стабилизированный ротатор доставляет возможность управлять собственной частотой колебаний радиального осциллятора.

2. При $a = 1$ $\frac{d^2 r}{dt^2} = 0$, $\frac{dr}{dt} = V = \text{const}$, $r = r_{01} + Vt$. Колебания не происходят.

3. При $a > 1$ $\frac{d^2 r}{dt^2} = (a^2 - 1)\omega_0^2 r$, $r = r_{01} e^{(\omega_0 \sqrt{a^2 - 1})t}$. Колебания не происходят.

Затухание колебаний в стабилизированном ротаторе принципиально не отличается от затухания в обычном маятнике.

Выбег ротатора в стабилизированном режиме

Минимальная полная энергия стабилизированного ротатора в стабилизированном ре-

жиме соответствует статическому смещению груза r_0 :

$$W_0 = K_0 + U_0 = 2K_0 = 2U_0 = kr_0^2.$$

Максимальная полная энергия теоретически неограниченна, а практически определяется конструктивно установленным максимальным радиусом r_m :

$$W_m = kr_m^2.$$

Пусть средняя за выбег мощность диссипативных потерь равна P .

Тогда время выбега составит

$$\tau = \frac{W_m - W_0}{P} = k \frac{r_m^2 - r_0^2}{P}.$$

Очевидно, что чем меньше P , тем меньше отклонение частоты вращения ω от собственной ω_0 .

Заключение

Заявленная цель работы достигнута. Механический аналог циклотронного движения определен. Им является стабилизированный ротатор, обладающий фиксированной частотой вращения, не зависящей от момента импульса и момента инерции.

Это означает, что при нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение.

Другими особенностями стабилизированного ротатора являются идентичность формулы частоты вращения формуле частоты пружинного маятника, равенство кинетической и потенциальной энергий и вытекающее из этого равенство радиуса вращения груза и деформации пружины.

Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом качестве он может иметь сильную конкуренцию со стороны мехатронных систем.

Напротив, в качестве стабилизатора вращения его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

Список литературы

1. Попов И. П. Антирезонанс — резонанс скоростей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 362—366. <https://doi.org/10.17587/mau.20.362-366>
2. Роров И. Р. Application of the Symbolic (Complex) Method to Study Near-Resonance Phenomena // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49, N. 12. P. 1053—1063. DOI: 10.3103/S1052618820120122
3. Попов И. П. Разновидности механической мощности // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 19—23. DOI: 10.52261/02346206_2022_1_19
4. Горячев О. В., Ефромеев А. Г. Алгоритм управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта с вращающимся основанием // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 3. С. 182—186. DOI: 10.17587/mau.16.182-186
5. Александров А. Ю., Александрова Е. Б. Одноосная стабилизация твердого тела при наличии запаздывания в обратной связи // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 12. С. 18—22.
6. Климина Л. А., Голуб А. П. Регулирование рабочих режимов ветроэнергетической установки с помощью дифференциальной планетарной передачи // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 4. С. 24—32.
7. Чичерова Е. В. Способы повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 6. С. 402—408. DOI: 10.17587/mau.16.402-408
8. Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н. Нейронечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины твд на базе ANFIS-сети // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 20—23.
9. Голицына М. В. Оптимальный выбор ускорения маятника в задачах управления вибрационным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 1. С. 31—39.
10. Попов И. П. Источники гармонических силы и скорости в мехатронных автоматических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 4. С. 208—216. <https://doi.org/10.17587/mau.22.208-216>
11. Wang Y., Duan X., Shao M., Wang C., Zhang H. An asymmetrical double torsion pendulum for studying coupled harmonic motion // American Journal of Physics. 2020. Vol. 88, N. 9. P. 760—768. DOI: 10.1119/10.0001613
12. Seekhao P., Parnichkun M., Tungpimolrut K. Development and control of a bicycle robot based on steering and pendulum balancing // Mechatronics. 2020. Vol. 69. P. 102386. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2020.102386
13. Wright J. A., Bartuccelli M., Gentile G. Comparisons between the pendulum with varying length and the pendulum with oscillating support // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2017. Vol. 449, N. 2. P. 1684—1707. DOI: 10.1016/j.jmaa.2016.12.076
14. Bamba K., Barrie N. D., Sugamoto A., Yamashita K., Takeuchi T. Ratchet baryogenesis and an analogy with the forced pendulum // Modern Physics Letters A. 2018. Vol. 33, N. 17. P. 1850097. DOI: 10.1142/S0217732318500979
15. Xu K., Hua X., Chen Z., Lacarbonara W., Huang Z. Exploration of the nonlinear effect of pendulum tuned mass dampers on vibration control // Journal of Engineering Mechanics ASCE. 2021. Vol. 147, N. 8. P. 0001961. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001961

Stabilized Rotator for Mechatronic Automatic Systems

I. P. Popov, ip.popov@yandex.ru,

Kurgan State University, Kurgan, 640020, Russian Federation

Corresponding author: **Popov Igor P.**, Senior Lecturer, Kurgan State University, Kurgan, 640020, Russian Federation, e-mail: ip.popov@yandex.ru

Accepted on June 28, 2022

Abstract

The aim of the work is to find a mechanical analogue of cyclotron motion and to determine the scheme of the corresponding device, which is appropriate to call a stabilized rotator. From the key circumstance that determines the possibility of generalizing cyclotron motion to mechanics, which consists in the fact that the Lagrangian of an electron is twice as large as its kinetic energy, which, as applied to a stabilized rotator, should be interpreted as the equality of kinetic and potential energies, it follows that the composition of a stabilized rotator should include elements, which are able to store both of these types of energy, namely, the load and the spring. The natural frequency of rotation of a stabilized rotator is strictly fixed (it does not depend on either the moment of inertia or the moment of momentum) and remarkably coincides with the natural frequency of oscillations of a pendulum with identical parameters. When the angular momentum changes, the radius and tangential velocity change (the rotation frequency does not change and is equal to its own). The position of the load, in which its center of mass coincides with the axis of rotation, corresponds to a state of indefinite equilibrium. During rotation, the load can deviate with equal probability in any of the two directions and, accordingly, both compression and extension of the spring can develop. The state of indefinite equilibrium can be eliminated by providing the initial (static) displacement of the load and the initial deformation of the spring equal to it. Just as the frequency does not coincide with the natural frequency during forced oscillations of the pendulum, the rotation frequency of a stabilized rotator under loading does not coincide with the natural rotation frequency. At zero torque in the stationary mode, the rotational speed of the stabilized rotator cannot be arbitrary and takes on a single value. A stabilized rotator can be used to control the natural frequency of a radial oscillator, although in this capacity it may have strong competition from mechatronic systems. On the contrary, as a rotation stabilizer, its competitive capabilities are undeniable and are determined by the extreme simplicity of the design.

Keywords: rotator, pendulum, frequency, stabilization, run-out, energy, angular momentum, cyclotron motion

For citation:

Popov I. P. Stabilized Rotator for Mechatronic Automatic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol.23, no. 10, pp. 523—528.

DOI: 10.17587/mau.23.523-528

References

1. **Popov I. P.** Antiresonance — velocity resonance, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 362—366, <https://doi.org/10.17587/mau.20.362-366> (in Russian).
2. **Popov I. P.** Application of the Symbolic (Complex) Method to Study Near-Resonance Phenomena, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, vol. 49, no. 12, pp. 1053—1063, DOI: 10.3103/S1052618820120122
3. **Popov I. P.** Varieties of mechanical power, *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2022, no. 1, pp. 19—23, DOI: 10.52261/02346206_2022_1_19 (in Russian).
4. **Goryachev O. V., Efromeev A. G.** Algorithm for controlling the stabilization drive and changing the angular position of an object with a rotating base, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 182—186, DOI: 10.17587/mau.16.182-186 (in Russian).
5. **Aleksandrov A. Yu., Aleksandrova E. B.** Uniaxial stabilization of a rigid body in the presence of feedback delay, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2014, no. 12, pp. 18—22 (in Russian).
6. **Klimina L. A., Golub A. P.** Regulation of the operating modes of a wind power plant using a differential planetary gear, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2014, no. 4, pp. 24—32 (in Russian).
7. **Chicherova E. V.** Methods for Improving the Quality of Speed Control of a Power Turbine of a Gas Turbine Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 402—408, DOI: 10.17587/mau.16.402-408 (in Russian).
8. **Titov Yu. K., Filippenkov R. G., Khizhnyakov Yu. N.** Neuro-Fuzzy Speed Controller of a HPT Power Turbine Based on the ANFIS Network, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2013, no. 10, pp. 20—23 (in Russian).
9. **Golitsyna M. V.** Optimal Choice of Pendulum Acceleration in Problems of Controlling a Vibrating Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 31—39 (in Russian).
10. **Popov I. P.** Sources of harmonic force and speed in mechatronic automatic systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 208—216, <https://doi.org/10.17587/mau.22.208-216> (in Russian).
11. **Wang Y., Duan X., Shao M., Wang C., Zhang H.** An asymmetrical double torsion pendulum for studying coupled harmonic motion, *American Journal of Physics*, 2020, vol. 88, no. 9, pp. 760—768, DOI: 10.1119/10.0001613
12. **Seekhao P., Parnichkun M., Tungpimolrut K.** Development and control of a bicycle robot based on steering and pendulum balancing, *Mechatronics*, 2020, vol. 69, pp. 102386, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2020.102386
13. **Wright J. A., Bartuccelli M., Gentile G.** Comparisons between the pendulum with varying length and the pendulum with oscillating support, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2017, vol. 449, no. 2, pp. 1684—1707, DOI: 10.1016/j.jmaa.2016.12.076
14. **Bamba K., Barrie N. D., Sugamoto A., Yamashita K., Takeuchi T.** Ratchet baryogenesis and an analogy with the forced pendulum, *Modern Physics Letters A*, 2018, vol. 33, no. 17, pp. 1850097, DOI: 10.1142/S0217732318500979
15. **Xu K., Hua X., Chen Z., Lacarbonara W., Huang Z.** Exploration of the nonlinear effect of pendulum tuned mass dampers on vibration control, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 2021, vol. 147, no. 8, pp. 0001961, DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001961



XX НАЦИОНАЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ (КИИ-2022)

г. Москва, с 21 по 23 декабря 2022 г.

Основные направления конференции

- Инженерия знаний
- Интеллектуальный анализ данных
- Интеллектуальный анализ текстов и семантический Web
- Когнитивные и психологические исследования в искусственном интеллекте
- Моделирование рассуждений и неклассические логики
- Нечеткие модели и мягкие вычисления
- Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и управления
- Многоагентные системы и искусственные сообщества
- Робототехнические системы
- Нейросетевые методы, нейроинформатика
- Эмоции и образы в искусственном интеллекте
- Компьютерное зрение
- Объясняемый искусственный интеллект в критических приложениях
- Инструментальные средства конструирования интеллектуальных систем
- Интеллектуальные технологии и прикладные интеллектуальные системы

Основные контакты

По вопросам подачи докладов: *Виноградов Дмитрий Вячеславович*, krrquest@tandex.ru

По общим вопросам: *Борисов Вадим Владимирович*, vbor67@mail.ru

В. И. Бусурин, д-р техн. наук, проф., vbusurin@mai.ru, **Лю Чжэ**, аспирант, lzg599312@hotmail.com,
П. С. Кудрявцев, канд. техн. наук, доц., mpso121@mail.ru,
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Управление бесконтактным профилометром при сканировании поверхностей сложного профиля

Рассматривается задача исследования профиля поверхности протяженной прецизионной детали сложной формы бесконтактным сканирующим профилометром с заданной точностью. Контакт измерительного блока с контролируемой поверхностью необходимо исключить из-за возможности повреждения изделия и, одновременно, обеспечить необходимую точность оценки его профиля. Для решения данной задачи в работе используется двухкантурная система, содержащая два датчика: преобразователь расстояния на основе оптического туннелирования для "точного" канала и преобразователь на основе хроматической аберрации для "грубого" канала сканирования. Показано, что на основе данных измерений "грубого" канала, обеспечивающего гарантируемое исключение контакта датчика "грубого" канала с поверхностью исследуемого изделия, можно прогнозировать положение и скорость перемещения датчика "точного" канала в целях исключения контакта с исследуемой поверхностью и обеспечения необходимой точности измерений. Разработана математическая модель динамической системы сканирования на основе априорной информации о входящих в нее элементах и блоках. Проведен анализ основных динамических свойств системы сканирования и построен закон ее управления, обеспечивающий требуемое качество переходных процессов на основе математического моделирования. Разработан алгоритм прогноза последующего положения датчика "точного" канала на основе данных измерений "грубого" канала, который обеспечивает требуемую скорость и точность сканирования в зависимости от прогнозируемой высоты профиля поверхности объекта. Разработана блок-схема алгоритма, определяющего значение перемещения датчика "точного" канала в вертикальном направлении в зависимости от полученной оценки измерений "грубого" канала. Проведенные исследования позволили разработать структурную схему двухкантурной измерительной системы. Было проведено моделирование данной системы в среде MATLAB/Simulink, которое позволило оценить эффективность ее функционирования для различных исследуемых профилей. Результаты моделирования показали эффективность предлагаемой схемы системы управления профилометром.

Ключевые слова: метод оптического туннельного эффекта, метод оценки положения чувствительного элемента, функция преобразования положения и скорости перемещения, прецизионный профилометр, бесконтактное сканирование поверхности

Введение

В настоящее время бесконтактные профилометры широко используются в промышленности для контроля точности изготовления сложных деталей в различных производственных направлениях [1–6]. Бесконтактные сканирующие профилометры, используемые для осуществления измерений без касания измерительного блока с исследуемой поверхностью объекта, могут использовать различные сенсоры [1–3, 5, 7–9], в том числе такие, как преобразователь расстояния на основе оптического туннелирования [5, 6] или преобразователь на основе хроматической аберрации [7–9]. Однако даже использование таких измерительных устройств не может исключить контакт сенсорного блока с поверхностью исследуемого объекта. Такое столкновение приводит не только к выходу из строя сенсора, но и может привести к порче исследуемого объекта, для конструирования которого были затрачены значительные материальные и временные ресурсы. Поэтому

возникает задача разработки такого измерительного устройства, которое бы обеспечивало, с одной стороны, исключение механического контакта сенсора с поверхностью объекта и его повреждения в процессе сканирования, а с другой стороны, гарантировало бы получение данных о профиле исследуемой поверхности объекта с заданной точностью [10–14].

Постановка задачи

Данные результатов измерений поверхности исследуемого объекта обычно представляются в виде раstra с равномерной сеткой с заданным до начала измерений шагом, определяющим расстояние между двумя последовательными точками. Однако, если поверхность объекта не является плоской, а имеет сложный профиль с участками различного наклона и высоты относительно некоторого заданного уровня, то тогда время для перехода от одной исследуемой точки поверхности к другой также должно быть различным. Это необходимо для построения

равномерной сетки сканирования поверхности объекта, учитывающей автоматически расстояние между точками различной высоты. Таким образом, скорость сканирования профилометра определяется не только заданным шагом сканирования, но и углом наклона исследуемой поверхности. Отсюда возникает задача управления значением шага перемещения бесконтактного профилометра в зависимости от значения угла наклона поверхности исследуемого объекта. Поэтому система управления перемещениями измерительного блока по вертикальной оси должна уметь прогнозировать высоту его положения на следующем шаге с учетом сохранения заданного промежутка между сенсором и исследуемой поверхностью, так как это определяет точность получаемых данных измерений. Трудность решения данной задачи также обусловлена тем, что перемещения измерительного блока осуществляются с помощью исполнительных устройств, обладающих определенными динамическими свойствами, которые не позволяют мгновенно перемещать сенсор в требуемое положение. При этом ставится условие исключения механического контакта сенсорного блока с поверхностью исследуемого объекта.

Схема решения поставленной задачи

Для решения поставленной задачи используется двухконтурная измерительная система, состоящая из туннельного оптического преобразователя (ОПП) и преобразователя на основе хроматической аберрации (ППХА).

Блок-схема бесконтактного сканирующего профилометра содержит следующие элементы (рис. 1): источник излучения (ИИ); оптический преобразователь приближения (ОПП) на осно-

ве оптического туннельного эффекта (ОТЭ); фотоприемник (ФП); преобразователь "ток—напряжение" ($I-U$); блок обработки (БО); усилитель (УС); пропорционально-дифференциальный регулятор (ПДР), который реализован в блоке обработки блока датчиков (БД); датчик положения ДП, измеряющий переменную z ; линейный двигатель перемещений вдоль оси OZ , например, линейный пьезоэлектрический двигатель *Piezolegs* (PL); подвижные моторизованные столики для осей OX и OY (ПСМ(OX) и ПСМ(OY)); датчик перемещения вдоль оси OZ (ДП) и преобразователь перемещения на основе хроматического aberrация (ППХА) [6, 8].

Оптический преобразователь приближения (ОПП) имеет следующие параметры: угол падения $\theta = 51^\circ$, показатель преломления преобразователя ОПП $n_1 = 1,53$; показатель преломления воздуха $n_2 = 1,0$, входная мощность излучения $P_{\text{ии}} = 100$ мВт, длина волны излучения $\lambda = 1,31 \cdot 10^{-6}$ м, радиус измерительного части преобразователя ОПП $r_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м.

При перемещении бесконтактного профилометра от текущей точки h_0 к следующей точке h_1 расстояние движения ПСМ(OX) по оси OX будет равно диаметру измерительной части преобразователя ОПП. В этом случае угол наклона сканирования $\alpha_{\text{нак}}$ можно определить как

$$\alpha_{\text{HAK}} = \text{arctg} \left(\frac{\Delta h}{\Phi_{\text{III}}} \right),$$

где Δh — разница высоты между точки h_0 и точки h_1 ; $\Phi_{\text{ш}}$ — расстояние при движении ПСМ(OX) из точки h_0 в точку h_1 .

На основе информации о скорости V_Z перемещения преобразователя ОПП по оси OZ и скорости V_X перемещения ПСМ(OX) угол наклона исследуемой поверхности можно также определить как

$$\alpha_{\text{нак}} = \text{arctg}\left(\frac{V_Z}{V_X}\right).$$

Схема для математического моделирования наклона исследуемой поверхности с помощью бесконтактного профилометра приведена на рис. 2.

В качестве исполнительного элемента *PL* нами был выбран линейный пьезоэлектрический двигатель *Piezolegs*. Его макси-

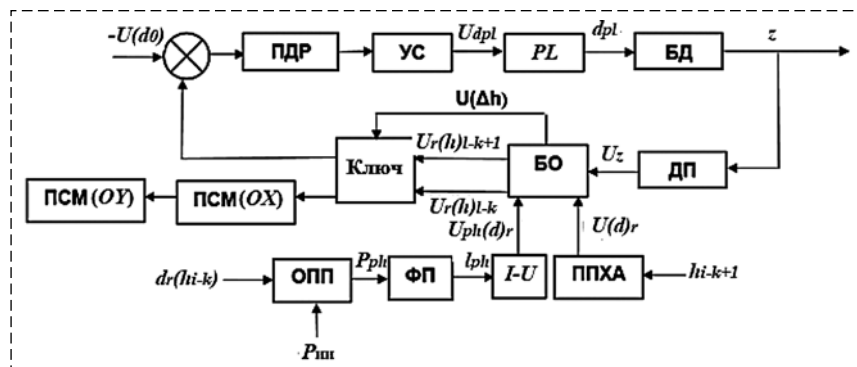


Рис. 1. Блок-схема системы сканирования бесконтактного сканирующего профилометра

Fig. 1. Flowchart of contactless scanning profiler's system

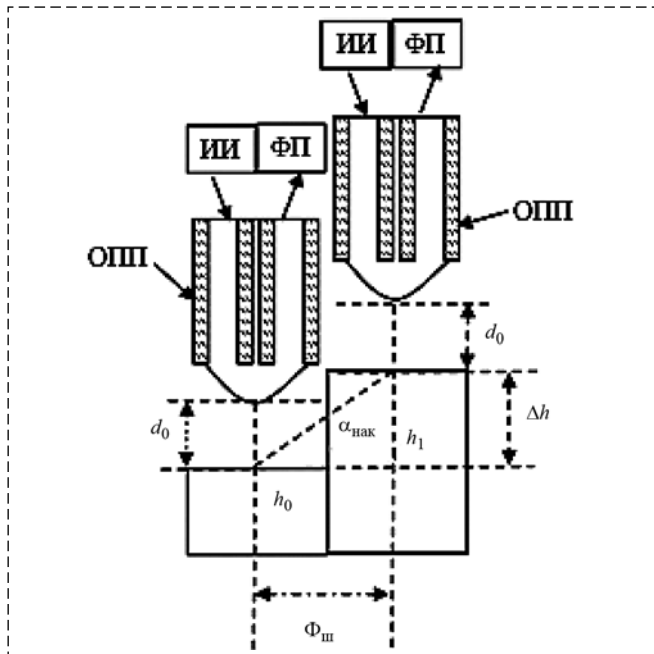


Рис. 2. Зависимость скорости движения оптического преобразователя от угла наклона поверхности

Fig. 2. Dependence of motion speed of optical converter on a surface slope angle

максимальная скорость движения равна 10 мм/с. В качестве канала грубого измерения был выбран преобразователь, максимальный диапазон измерения которого равен 100 мкм.

При значении смещения $\Phi_{ш} = 30$ мкм по оси OX максимально определяемый наклон исследуемой поверхности будет равен

$$\alpha_{нак, \max} = \arctg\left(\frac{h_{\max}}{\Phi_{ш}}\right) = 1,279.$$

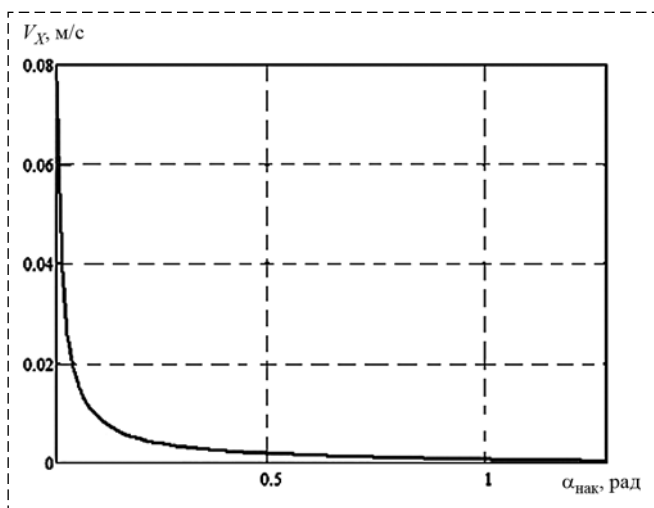


Рис. 3. Зависимость скорости V_X движения по оси OX от угла $\alpha_{нак}$ наклона сканируемой поверхности

Fig. 3. Dependence of axis OX movement speed V_X from a slope angle $\alpha_{нак}$ of the scanned surface

В этом случае максимальная скорость движения по оси OX будет равна

$$V_{X, \max} = \frac{V_{Z, \max}}{\arctg(\alpha_{нак, \max})} = 3,004 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Если скорость двигателя PL равна $V_Z = 1$ мм/с, а наклон сканирования изменяется от 0,01 до 1,279 радиан, то зависимость скорости движения V_X по оси OX от угла наклона исследуемой поверхности сканирования имеет вид, приведенный на рис. 3.

Зависимость скорости V_Z движения по оси OZ от угла наклона исследуемой поверхности при скорости перемещения ПСМ(OX) показана на рис. 4.

Из графиков (рис. 3 и рис. 4) можно понять, что скорость сканирования по оси OX обратно пропорциональна углу наклона поверхности объекта и пропорциональна скорости перемещения пьезоэлектрического двигателя по оси OZ . Поскольку бесконтактный профилометр использует преобразователь приближения на основе ОТЭ для точного измерения высоты поверхности объекта, а преобразователь ППХА — для прогнозирования высоты следующей точки, то с помощью пьезоэлектрического двигателя можно компенсировать разницу в значении зазора между преобразователем приближения и поверхностью объекта. Это исключает контакт ОТЭ с поверхностью объекта.

Рассмотрим алгоритм работы бесконтактного профилометра с системой прогноза высоты. Перед началом сканирования происходит самотестирование профилометра, и датчик

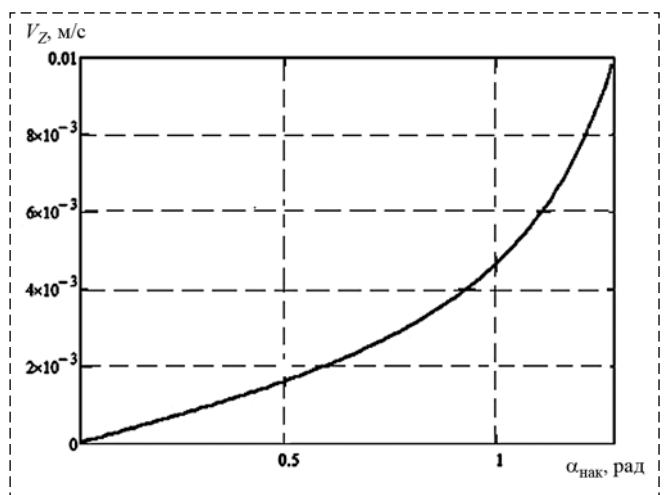


Рис. 4. Зависимость скорости V_Z движения по оси OZ от угла $\alpha_{нак}$ наклона поверхности сканирования

Fig. 4. Dependence of axis OZ movement speed V_Z from a slope angle $\alpha_{нак}$ of the scanned surface

системы устанавливается на начальную точку поверхности тела. Так как расстояние между датчиками ОПП и ППХА превышает шаг горизонтального сканирования в k раз, то первые k шагов сканирования работает канал "грубого" измерения зазора, информация об измеренных данных которого поступает в БО (блок обработки данных). Через k шагов сканирования начинает поступать информация от канала "точного" измерения зазора (переменная ZT). Таким образом, к моменту появления первого точного значения зазора в памяти БО имеется упреждающая информация о $k + 1$ значениях грубого зазора, и система прогноза высоты начинает свою работу. Используя информацию датчика положения (ДП) о высоте ОПП и ППХА в соответствующих точках, БО вычисляет точное значение высоты в точке сканирования № 1 и грубое значение высоты в точке сканирования № 2. Далее вычисляется прогнозируемое значение перепада высот.

Если прогнозируемое значение превышает заданную максимальную разницу высоты поверхности, то система сканирования не может компенсировать разницу высоты поверхности. В этом случае система сканирования принимает решение: следует ли остановить скани-

рование. Если "Да", система остановится; если "Нет", то уменьшается коэффициент ПСМ(OX), и повторно происходит этап вычисления.

В случае, если значение перепада высот не превышает максимальную разницу высоты, система сравнивает значение перепада высот со значением начального зазора d_0 . Если его значение превышает d_0 , то следящая система поднимает блок датчиков на величину Δz , при котором прогнозируемое значение перепада высот будет равно d_0 . Далее подается команда на привод ПСМ(OX), и блок датчиков перемещается в точку № 2.

В случае, если прогнозируемое значение перепада высот не превышает d_0 , сразу подается команда на привод ПСМ(OX), и блок датчиков перемещается в точку № 2. В точке сканирования № 2 запускается следящая система системы прогноза, которая устанавливает номинальное значение зазора dT , равное d_0 .

Данная процедура повторяется до тех пор, пока блок датчиков не достигнет последней точки сканирования, после чего сканирующий блок возвращается в исходное положение, и подается команда на привод ПСМ(OY). Соответственно, происходит перемещение блока датчиков на один шаг вдоль координаты OY , и работа системы сканирования повторяется.

На рис. 5 приведена блок-схема работы бесконтактного сканирующего профилометра, использующего алгоритм прогноза перемещения оптического преобразователя.

Моделирование процесса функционирования бесконтактного профилометра

Моделирование работы системы сканирования при различных значениях высоты h в среде *MATLAB/Simulink* осуществлялось для заданных параметров звеньев исследуемой пьезоэлектрического двигателя PL и подвижного моторизованного столики ПСМ(OX), приведенных ниже:

k_{yc}	60...240
k_{pl} , (нм/с)/В	$4,42 \cdot 10^4$
T_{yc} , с.	$1,5 \cdot 10^{-6}$
T_{pl} , с.	$9,9 \cdot 10^{-5}$
$k_{псм}$, (нм/с)/В	100...200
$T_{псм}$, с.	$1 \cdot 10^{-6}$

В качестве исполнительного элемента PL , как уже указывалось в данной работе, был выбран пьезоэлектрический двигатель на основе

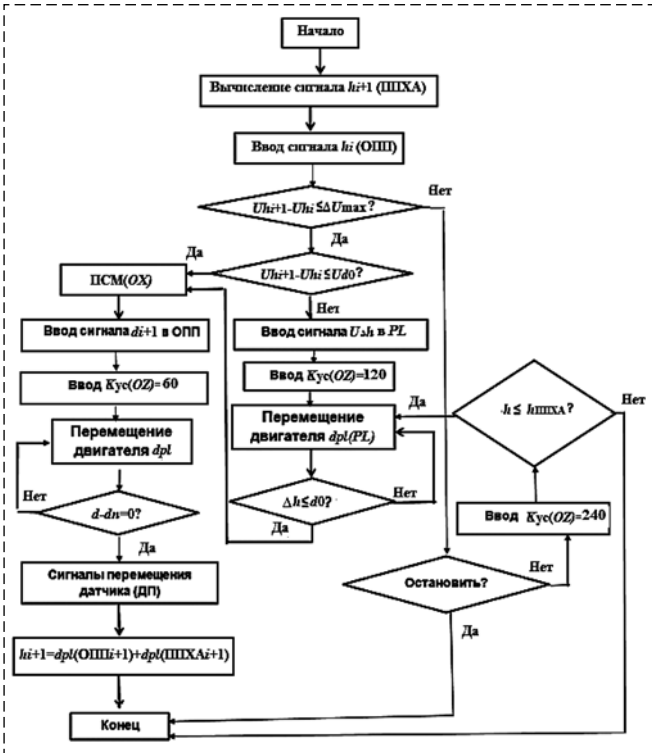


Рис. 5. Алгоритм функционирования системы сканирования бесконтактного сканирующего профилометра

Fig. 5. Algorithm of scanning system of the contactless profilometer

обратного пьезоэлектрического эффекта. Передаточная функция двигателя, отражающая динамическую зависимость перемещения от напряжения, определяется как

$$W_{pl}(s) = V_{pl}(s) \frac{1}{s} = \frac{k_{yc}k_{pl}}{(T_{pl}s + 1)s}.$$

Здесь k_{yc} — коэффициент усилителя напряжения; k_{pl} , (нм/с)/В — коэффициент передачи, определяющий скорость перемещения пьезоэлектрического двигателя в зависимости от величины, поданного на него напряжения; T_{pl} , с — постоянная времени пьезоэлектрического двигателя.

В качестве исполнительного элемента ПСМ (по осям OX и OY) были выбраны подвижные моторизованные столики. Передаточная функция исполнительных элементов, отражающая динамическую зависимость перемещения от напряжения, определяется как

$$W_{PCM}(s) = V_{PCM}(s) \frac{1}{s} = \frac{k_{PCM}}{(T_{PCM}s + 1)s},$$

где k_{PCM} , (нм/с)/В — коэффициент усиления подвижного моторизованного столика; T_{PCM} , с — постоянная времени.

Анализ данных моделирования показал, что:

- если коэффициент $k_{yc} = 240$, то при большой разнице высоты между двумя точками поверхности объекта система сканирования имеет самую быструю скорость измерения, а в диапазоне точности измерения система имеет значительные осцилляции выходного сигнала;

- если коэффициент $k_{yc} = 60$, то при большой разнице высоты между двумя точками поверхности объекта система сканирования имеет самую низкую скорость измерения.

В промежуточном диапазоне у системы наблюдается небольшое увеличение инерционности канала прямого преобразования при полном отсутствии осцилляций выходного сигнала. При значи-

тельной разнице высоты между двумя точками поверхности объекта система сканирования будет иметь наибольшую скорость измерений при значении коэффициента $k_{yc} = 60$. В этом случае максимальные значения угла наклона $\alpha_{нак}$ и скорости движения V_X по оси OX имеют следующие значения: $V_X = 1$ мм/с, $\alpha_{нак} = 39,8^\circ$.

При этом бесконтактный профилометр позволяет измерять максимальную разницу высоты поверхности объекта, равную $\Delta h = 25$ мкм.

На рис. 6 показан пример сканирования поверхности тела в 10 точках при изменении высот h в следующей последовательности: 250 нм, 150 нм, 1500 нм, 3000 нм, -2000 нм, 1000 нм, -1000 нм, 24 000 нм, 74 000 нм и 44 000 нм.

На рис. 7 приведен график перепадов высот Δh , нм, исследуемой поверхности в точках измерений.

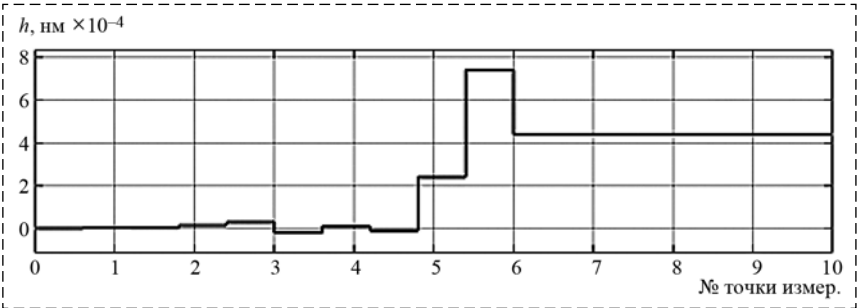


Рис. 6. Профиль высот исследуемой поверхности
Fig. 6. Profile of surface's heights under study

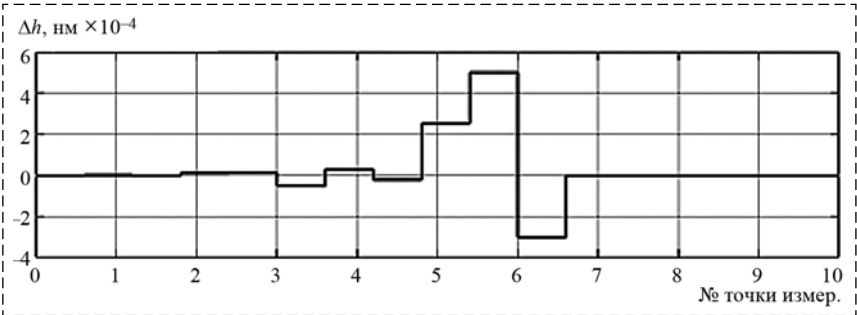


Рис. 7. График перепадов высот исследуемой поверхности
Fig. 7. Diagram of height differences of the studied surface

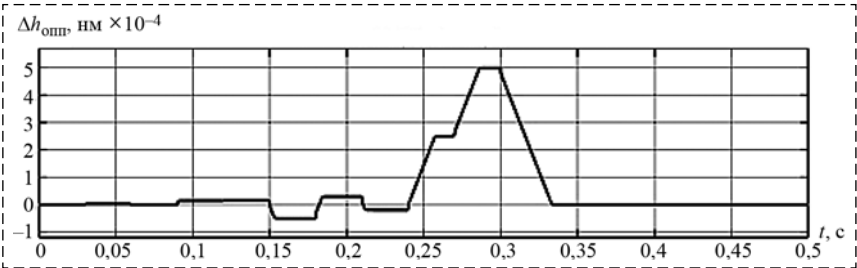


Рис. 8. Траектория перемещения оптоэлектронного блока датчиков вдоль оси OX при сканировании исследуемой поверхности
Fig. 8. Trajectory of optoelectronic block's movement along OX axis during scanning of studied surface

На рис. 8 приведена траектория перемещения блока датчиков пьезоэлектрическим двигателем вдоль оси OX при сканировании поверхности, профиль которой указан на рис. 6 и 7.

На рис. 8 показано, что в точке № 6, указанной на рис. 7, имеющей перепад высот от 54 000 нм до –24 000 нм, разница высот поверхности будет превышать максимальную разницу, а поэтому бесконтактный профилометр остановит сканирование и его выходной сигнал примет значение, равное 0.

Если разница высот поверхности превышает максимальную разницу (25 мкм) и не превышает максимальную диапазон измерения ППХА (50 мкм), то бесконтактный профилометр позволяет увеличивать коэффициент управления пьезоэлектрическим двигателем k_{yc} и продолжать сканирование. Таким образом, алгоритм управления бесконтактным профилометром может обеспечить точность сканирования путем изменения соответствующей скорости сканирования, а также исключить механический контакт из-за больших углов наклона поверхностей объекта.

Заключение

Исследована структурная схема системы сканирования бесконтактного профилометра, содержащая грубый и точный каналы измерения. В качестве грубого измерителя перемещения бесконтактного профилометра был выбран преобразователь на основе хроматической аберрации для прогнозирования высоты поверхности тела в процессе сканирования ("грубый" канал измерения). В "точном" канале измерения используется преобразователь приближения на основе ОТЭ.

Для системы сканирования был разработан алгоритм управления, обеспечивающий перемещение сенсора точного измерения при исследовании поверхности со сложным рельефом и большим перепадом высот. Показано, что сканирование останавливается, когда перепад высот слишком велик, чтобы исключить контакт датчика с поверхностью объекта.

На основе линеаризованной математической модели предложенного двухканального профилометра, с учетом экспериментально подтвержденных характеристик преобразователя с оптическим туннелированием было проведено моделирование функционирования

системы управления положением ОПП в среде *MATLAB/Simulink* для разных профилей высот поверхности.

Показано, что предлагаемая схема системы управления является работоспособной и обеспечивает сканирование высоты поверхности, а также исключает механический контакт датчика на основе ОТЭ с исследуемой поверхностью в процессе ее сканирования.

Список литературы

1. Двойнишников С. В., Аникин Ю. А., Кабардин И. К., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности трехмерных крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 13–17.
2. Böckmann H., Liu S., Müller M., Hammud A., Wolf M., Kumagai T. Near-Field Manipulation in a Scanning Tunneling Microscope Junction with Plasmonic Fabry-Pot Tips // Nano Lett. 2019. Vol. 19, N. 6.
3. Chen C. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy. Oxford University Press, 2021. 528 p.
4. Voigtländer B. Scanning Probe Microscopy (Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy). Springer, 2015. 382 p.
5. Xuan Z., Wu R., Tuan C., Chao D., Huixia G., Huanhuan L. Design of High-speed and High-precision Scanning Galvanometer Control System Based on FPGA + DSP Architecture // IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). 2021. P. 3455–3459. DOI: 10.1109/iSPEC53008.2021.9735706.
6. Оптический профилометр на базе микроинтерферометра МИИ-4М [Электронный ресурс]. Новосибирск: ЗАО "Дифракция". URL: <http://www.diffraction.ru/products-ru/mii-4>.
7. Palomer A., Ridao P., Forest J., Ribas D. Underwater laser scanner: ray-based model and calibration // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2019. Vol. 24, N. 5. P. 1986–97.
8. Jin L., Li L. Optical driven electromechanical transistor based on tunneling effect // Optics Letters. Vol. 40, Iss. 8. 2015. P. 1798–1805.
9. An Y., Li B., Hu H., Zhou X. Building an omnidirectional 3-D color laser ranging system through a novel calibration method // IEEE Trans Ind Electron. Vol. 66, N. 11. 2019. P. 8821–8831.
10. Zheng Q., Chen L., Han Z. A non-contact swing-arm profilometer with the spectrally-resolved-interferometry distance sensor // Engineering Research Express. 2020. Vol. 2, N. 1.
11. Guo L., Wang H., Wang C., Lin Z. Optical Path Scanning Control System Based on Repetitive Control and PI Control // Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). 2018. P. 1071–1074. DOI: 10.1109/IMCCC.2018.00223.
12. Lei P., Zheng L. An automated in-situ alignment approach for finish machining assembly interfaces of large-scale components // Robot Comput Integr Manuf. 2017. Vol. 46. P. 130–43.
13. Li Y., Xu Q. Design and Robust Repetitive Control of a New Parallel-Kinematic XY Piezostage for Micro/Nanomanipulation // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Vol. 17, N. 6, 2012. P. 1120–1132. DOI: 10.1109/TMECH.2011.2160074.
14. Бусурин В. И., Лю Чжэ, Кудрявцев П. С., Шлеенкин Л. А. Исследование двухканальной системы управления положением оптического преобразователя прецизионного бесконтактного сканирующего профилометра // Датчики и системы. 2020. № 9–10. С. 25–32.

Control of Contactless Profilometer for Scanning Surfaces of Complex Profile

V. I. Busurin, vbusurin@mai.ru, Liu Zhe, lzg599312@hotmail.com, P. S. Kudryavtsev, mpso121@mail.ru, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: Kudryavtsev P. S., PhD, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: mpso121@mail.ru

Accepted on June 28, 2022

Abstract

The research problem of a surface's profile with an extended precision detail of irregular shape with a given accuracy is considered by the contactless scanning profilometer. The contact of the measuring block with a controlled surface needs to be excluded because of a possibility of damage of a product and, at the same time, to provide the necessary accuracy of assessment of its profile. For the solution of this task in work the double-circuit system containing two sensors is used: the distance converter on the basis of optical tunneling for the "exact" channel and the converter on the basis of a chromatic aberration for "rough" channel of scanning. It is shown that based on these measurements of the "rough" channel providing the guaranteed exception of contact of "rough" channel's contact with a surface of the studied product. It is possible to predict situation and traverse speed of the sensor of the "exact" channel for the purpose of an exception of contact with the studied surface and ensuring necessary accuracy of measurements. The mathematical model of a dynamic system of scanning based on a prior information about entering it elements and blocks is developed. The analysis of the main dynamic properties of a system of scanning is carried out and the law of its management providing the required quality of transition processes based on mathematical modeling is constructed. The algorithm of the forecast of the subsequent position of the sensor of the "exact" channel based on these measurements of "rough" channel, which provides the required speed and accuracy of scanning depending on the predicted object's surface profile height is developed. The flowchart of the algorithm determining the value of movement of the sensor of the "exact" channel in the vertical direction depending on the received assessment of measurements of "rough" channel is developed. The conducted researches allowed developing the block diagram of a double-circuit measuring system. Modeling of this system in the environment of MATLAB/SIMULINK, which allowed evaluating efficiency of its functioning for the different studied profiles was carried out. Results of modeling showed efficiency of the offered scheme of a profilometer's control system.

Keywords: Optical tunnel effect method, sensor position scanning system, the conversion function, precision profilometer, non-contact surface scanning

For citation:

Busurin V. I., Zhe L., Kudryavtsev P. S. Control of Contactless Profilometer for Scanning Surfaces of Complex Profile, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 529—535.

DOI: 10.17587/mau.23.529-535

References

1. Dvoynishnikov S. V., Anikin Yu. A., Kabardin I. K., Kulikov D. V., Meledin V. G. Optoelectronic method of contactless measurement of a profile of a surface of three-dimensional large-size objects of irregular shape, *Measuring equipment*, 2016, no. 1, pp. 13—17.
2. Böckmann H., Liu S., Müller, M., Hammud A., Wolf M., Kumagai T. Near-Field Manipulation in a Scanning Tunneling Microscope Junction with Plasmonic Fabry-Pérot Tips., *Nano Lett.*, 2019, vol 19, no.6.
3. Chen C. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy, Oxford University Press, 2021, 528 p.
4. Voigtländer B. Scanning Probe Microscopy (Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy), Springer, 2015, 382 p.
5. Xuan Z., Wu R., Tuan C., Chao D., Huixia G., Huanhuan L. Design of High-speed and High-precision Scanning Galvanometer Control System Based on FPGA + DSP Architecture, *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC)*, 2021, pp. 3455—3459, DOI: 10.1109/ISPEC53008.2021.9735706.
6. Optical profilometer based on microinterferometer MII-4M [Electronic resource], CJSC Diffraktion, Novosibirsk, available at: <http://www.diffraktion.ru/products-ru/mii-4>.
7. Palomer A., Ridao P., Forest J., Ribas D. Underwater laser scanner: ray-based model and calibration, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 24, no. 5, 2019, pp. 1986—97.
8. Jin L., Li L. Optical driven electromechanical transistor based on tunneling effect, *Optics Letters*, 2015, vol. 40, iss. 8, pp. 1798—1805.
9. An Y., Li B., Hu H., Zhou X. Building an omnidirectional 3-D color laser ranging system through a novel calibration method, *IEEE Trans Ind Electron*, vol. 66, no. 11, 2019, pp. 8821—8831.
10. Zheng Q., Chen L., Han Z. A non-contact swing-arm profilometer with the spectrally-resolved-interferometry distance sensor, *Engineering Research Express*, 2020, vol. 2, no. 1.
11. Guo L., Wang H., Wang C., Lin Z. Optical Path Scanning Control System Based on Repetitive Control and PI Control, *Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, 2018, pp. 1071—1074, DOI: 10.1109/IMCCC.2018.00223.
12. Lei P., Zheng L. An automated in-situ alignment approach for finish machining assembly interfaces of large-scale components, *Robot Comput Integr Manuf.*, 2017, vol. 46, pp. 130—43.
13. Li Y., Xu Q. Design and Robust Repetitive Control of a New Parallel-Kinematic XY Piezostage for Micro/Nanomanipulation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, vol. 17, no. 6, pp. 1120—1132, DOI: 10.1109/TMECH.2011.2160074.
14. Busurin V. I., Zhe L., Kudryavtsev P. S., Shleenkin L. A. A research of double-circuit control system's position of optical converter precision contactless scanning profilometers, *Sensors and systems*, 2020, no. 9—10, pp. 25—32.

Т. Б. Атыгаев, докторант, atgv95@gmail.com, В. П. Ивель, д-р техн. наук, проф., ivelvic@mail.ru,

Ю. В. Герасимова, канд. техн. наук, доц., julyvic@mail.ru,

Некоммерческое акционерное общество "Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева",
г. Петропавловск, Казахстан

Адаптивное управление планированием реактивного снаряда на пассивном участке полета по программно-заданной траектории

Решается задача, направленная на создание системы управления планированием реактивного снаряда (РС) и относящаяся к категории задач внешней баллистики. Существующая методика расчета дальности полета РС, основанная на зависимости траектории полета от начального угла тангажа снаряда и прогнозируемых значений параметров возмущающих воздействий, не обеспечивает необходимую точность заданной дальности полета снаряда. Практика проведения пробных запусков РС для определения необходимого угла тангажа связана с существенными материальными затратами. Поэтому применение методов имитационного компьютерного моделирования является наиболее перспективным подходом для исследования законов рассеивания РС и разработки на этой основе системы управления планированием снаряда на пассивном участке траектории полета.

Предложенная система управления планированием РС основана на использовании эталонной траектории полета РС, рассчитанной для прогнозируемых средних значений скорости продольной составляющей ветра. Предложен алгоритм управления планированием РС за счет изменения угла поворота горизонтального оперенья, основанный на зависимости вертикальной и горизонтальной координат снаряда от угла тангажа. Для разработки алгоритма использовалась компьютерная система визуального программирования Simulink. В результате получена структурная схема управления планированием РС, включающая модель траектории его полета как объекта управления и бортовую систему управления, организованную на базе двухъядерного микроконтроллера ESP-32. Предложена методика беспроводной записи программы управления в память микроконтроллера в полевых условиях. На базе пакета Simulink Desktop Real-Time разработана полунатурная модель полета РС, включающая микроконтроллер ESP-32, плату PCI-1710HG и Simulink-модель траектории полета снаряда с переменной массой в вертикальной плоскости. Проведена серия экспериментов, показавшая высокую степень точности попадания снаряда в цель.

Ключевые слова: реактивный снаряд, система управления, микроконтроллер, ESP-32, эталонная модель, MATLAB, Simulink

Введение

Сухопутные войска, военно-воздушные силы и военно-морской флот многих стран вооружен реактивными системами залпового огня (РСЗО) — комплексом вооружения, включающим многозарядную пусковую установку и реактивные снаряды (РС).

Калибр современных снарядов достигает 425 мм, максимальная дальность стрельбы — до 45 км и более. РСЗО несут от 4 до 50 РС. Каждый снаряд имеет свою отдельную направляющую для запуска [1–6].

Современные системы коррекции движения РС позволяют воздействовать на траекторию полета РС, благодаря чему минимизируются ошибки прицеливания, последствия возмущающего воздействия атмосферы, начальных ус-

ловий пуска и других факторов, отклоняющих снаряд от конечной цели [7, 8].

Достаточно много публикаций посвящено созданию систем управления планированием полета РС. В публикациях не описываются необходимые для приложений и реализации математические модели и детали алгоритмов, а приводятся только окончательные результаты. При этом практически отсутствуют источники, в которых имелась бы точная алгоритмическая схема, подходящая для написания программного обеспечения. В основном это связано с тем, что такое программно-математическое обеспечение является или коммерческой тайной, или интеллектуальной собственностью разработчика программно-математического обеспечения [9, 10].

Анализ научных публикаций показал, что предложенные системы, устройства и алгорит-

мы включают достаточно сложные решения, требующие значительной доработки конструкции РС, в частности, тормозных систем, отклонения носовой части снаряда и т. д. В то же время остается без должного внимания довольно широкий круг вопросов, например, анализ полетных характеристик в условиях нестационарных аэродинамических параметров среды или синтез оптимальных систем коррекции неуправляемых РС, требующих минимальной доработки конструкции и обеспечивающих, в то же время, максимальную точность стрельбы [11, 12]. Все это говорит об актуальности рассматриваемых проблем и требует дополнительных исследований.

Постановка задачи

Существующие РСЗО оснащены неуправляемыми РС. Поскольку одним из недостатков данных систем является значительное рассеивание снарядов, то главные тенденции их развития — разработки в области увеличения калибра боеприпасов, расширения спектра решаемых задач, повышения скорости перезарядки, дальности и точности стрельбы.

Задача данного исследования — разработать метод управления планированием полета РС, обеспечивающий заданную дальность и точность стрельбы, а также минимальное время для подготовки следующего залпа. Предложено решать поставленную задачу с помощью адаптивной системы управления планированием РС на пассивном участке полета по программно-заданной траектории. С этой целью необходимо:

- разработать структуру системы управлением планированием РС с использованием программно-заданной эталонной траектории полета РС при прогнозируемых значениях скорости встречного ветра;

- разработать алгоритм управления планированием РС и построить Simulink-модель, включающую систему управления планированием и систему имитации полета РС;

- провести компьютерную апробацию алгоритма управления планированием РС;

- провести полунатурное моделирование процесса запуска РС в реальном режиме времени с использованием программного пакета Simulink Desktop Real-Time, микроконтроллера ESP-32, многофункциональной платы PCI-1710HG и Simulink-модели траектории полета РС с переменной массой в вертикальной плоскости.

Математическая модель динамики РС как объекта управления

Движение РС в вертикальной плоскости описывается системой дифференциальных уравнений [13]:

— для скоростной системы координат XOY :

$$F_X = m\dot{V} = T - D - W \sin \gamma; \quad (1)$$

$$F_Y = mV\dot{\gamma} = L - W \cos \gamma; \quad (2)$$

$$D = qSC_R = 0,5\rho V^2 SC_R = V^2 C_D; \quad (3)$$

$$L = V^2 C_L; \quad (4)$$

— для земной системы координат xOy :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \gamma; \\ \dot{y} &= V \sin \gamma; \end{aligned} \quad (5)$$

$$m = m_0 - \int_0^{t_3} \dot{m}_s dt. \quad (6)$$

Здесь F_X — равнодействующая сила, направленная по скорости движения РС V ; F_Y — равнодействующая сила, направленная по нормали к скорости движения РС; m — переменная масса снаряда; m_0 — стартовая масса ракеты; $\dot{m}_s$ — массовый расход топлива в единицу времени; α — угол атаки; μ — угол крена (в уравнениях отсутствует угол α , поскольку на временном участке работы реактивного двигателя (≈ 2 с) полагается, что $\alpha = 0$ и $\mu = 0$); D — аэродинамическое сопротивление; q — скоростной напор набегающего невозмущенного потока; S — характерная площадь ракеты; C_R — безразмерный аэродинамический коэффициент, зависящий в основном от формы ракеты, числа Маха M , числа Рейнсоляда $Re = Vd\rho/\mu$, углов атаки α и скольжения β (принято $\beta = 0$) [14]; C_D — коэффициент, имеющий размерность Н/м; W — вес РС; γ — угол тангажа; F_Y — равнодействующая сила, направленная по нормали к скорости движения РС V ; L — аэродинамическая подъемная сила, $L = CLV^2$, где $C_L = (1/2)C_{\alpha}\rho S_M$, и при малых углах атаки α становится пропорциональным углу атаки [15]; μ — угол крена; $[\dot{x}, \dot{y}]^T$ — скорости поступательных движений РС; T — тяга реактивного двигателя:

$$T(t) = \begin{cases} T_0, & t_3 \geq t > 0, \\ 0, & t \geq t_3, \end{cases}$$

t_3 — время сгорания топлива.

Структура системы управления планированием РС

На рис. 1 представлена структурная схема бортовой системы управления планированием РС. Бортовая система управления построена на основе двухядерного микроконтроллера ESP-WROOM-32. Такой выбор объясняется тем, что при реализации программы управления целесообразно разделить во времени два процесса: процесс симуляции заданной траектории полета и процесс непосредственного управления планированием РС, включая измерение текущих параметров полета РС и формирование алгоритма управления углом поворота горизонтального оперения. Кроме того, наличие в составе ESP-32 Wi-Fi — приемопередатчиков позволяет в полевых условиях оперативно и в беспроводном режиме загружать управляющую программу в память микроконтроллера.

Таким образом, структурная схема (рис. 1) включает два основных блока: блок реализации программной модели заданной траектории РС (ПМТ), или генератора желаемой траектории, и блок управления оперением РС (БУО), включая аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), которые также входят в состав микроконтроллера. Также к системе управления можно отнести электромеханический привод оперенья (ЭПО), датчики высоты нахождения РС (ДВ) и его горизонтальной скорости (ДС), включая аппаратный интегратор (И) для получения горизонтальной координаты РС. Привод ЭПО можно считать инерционным звеном с минимальной постоянной времени.

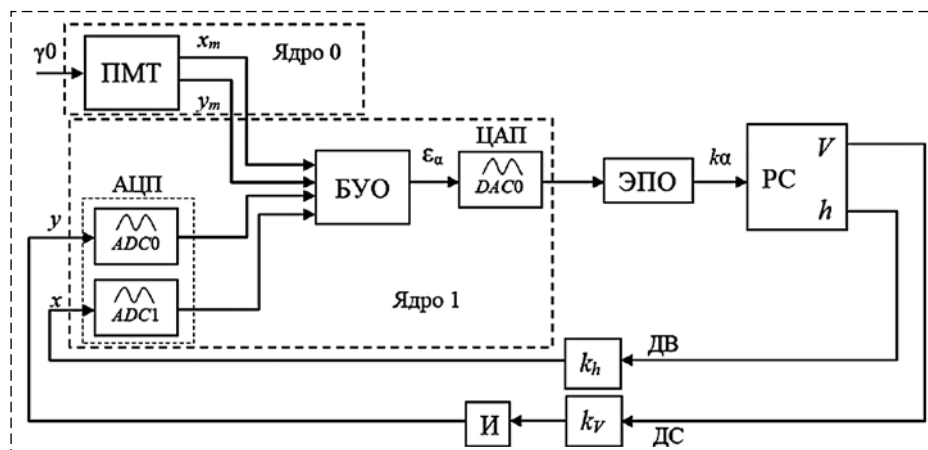


Рис. 1. Структурная схема бортовой системы управления планированием РС
Fig. 1. Block diagram of the on-board control system for planning a rocket projectile

Алгоритм управления планированием РС

Реальная траектория полета РС в полевых условиях в основном под влиянием встречного ветра может значительно отличаться от заданной траектории, т. е. создается ошибка [16]

$$\varepsilon(t) = f_{xy}(t) - f_{mxy}(t), \quad (7)$$

где $f_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2}$ и $f_{mxy} = \sqrt{x_m^2 + y_m^2}$ — соответственно модули вектора движения ракеты и ее модели в вертикальной плоскости.

Минимизировать ошибку можно с помощью управления аэродинамической подъемной силой $L = CLV^2$. Коэффициент C_L можно представить в виде $C_L = (1/2)C_{\alpha}\alpha\rho S_M = \alpha C_{L1}$. Таким образом, управлять аэродинамической подъемной силой, а значит, и минимизировать ошибку $\varepsilon(t)$ можно изменением угла атаки РС. В этом случае угол атаки α является функцией аргумента ε рассогласования модулей векторов движения РС и модели РС, т. е. $\alpha = f(\varepsilon)$. В бортовой системе управления (рис. 1) сигнал $\varepsilon(t)$ поступает на электромеханический привод, который управляет поворотом опереньем РС. Поворот оперенья приводит к изменению угла атаки РС. Все перечисленные звенья, связывающие переменные α и ε , относятся к классу пропорциональных, поэтому при моделировании процесса полета РС использовалось линейное соотношение $\alpha = k\varepsilon$.

Уравнение (2) в данном случае можно представить в следующем виде:

$$mV\gamma = \alpha C_{L1}V^2 - W \cos \gamma. \quad (8)$$

Объединяя уравнения (1) и (8) и исключая из уравнений угол тангажа γ , можно получить нелинейную функцию

$$\alpha = F(m, V, W, T, D). \quad (9)$$

Задача заключается в поиске функции $\varepsilon = f(x, y, x_m, y_m)$, которая бы обеспечила минимальное расхождение траекторий полета РС и ее модели.

Наиболее часто в системах с эталонной моделью для поиска экстремума функций многих переменных использу-

ют метод градиента. Однако существенные нелинейности системы уравнений полета РС создают определенные трудности в применении этого метода и вызывают необходимость предварительной линеаризации системы, что приводит к неточному и достаточно громоздкому математическому выражению для вектора функции коррекции. В результате серии экспериментов компьютерного моделирования различных упрощенных вариантов реализации вектора функции управления для коррекции полета РС был подобран следующий закон управления опереньем:

$$\varepsilon_\alpha = \begin{cases} \int k_x(x_m - x)dt + k_y(y_m - y), & \dot{x} > 0, \\ \int k_x(x_m - x)dt, & \dot{x} \leq 0. \end{cases} \quad (10)$$

где k_{x1} , k_{x2} , k_y — коэффициенты пропорциональности.

Сигнал ε поступает на электромеханический привод оперения, поворот которого приводит к изменению угла атаки РС.

В работе [17] коррекция траектории РС основывалась на слежении системы управления за модулем вектора перемещения РС эталонной модели в пространстве координат x_0y . Однако реализация предложенного алгоритма приводила к тому, что при равенстве модулей векторов модели траектории РС и действительной траектории полета РС не обеспечивалось равенство координат векторов, т. е. $[x_m, y_m]^T$ и $[x, y]^T$. Это обстоятельство приводило к значительной статической ошибке в коррекции траектории при разных направлениях встречного ветра. В данном случае предлагается управление, которое можно разделить на два временных этапа: первый длится от момента запуска РС до достижения им точки максимума траектории, т. е. точки, где вертикальная скорость снаряда равна 0. Этому участку соответствует первое уравнение системы (10), которое включает два слагаемых: первое — интеграл от разности горизонтальной координаты РС и ее модели, и второе — линейная функция от разности высот нахождения РС и его модели. В этом уравнении доминирует второе слагаемое, т. е. на этом участке полета РС система коррекции стремится поддерживать заданную высоту полета РС. При этом первое слагаемое придает определенный астатизм процессу коррекции координаты x . Второму участку, участку планирования, соответствует второе уравнение, которое минимизирует отклонение дальности реальной траектории полета РС от дальности

программно-заданной траектории и при этом обеспечивает астатический характер управления. Такое параметрическое разделение процесса управления обеспечивает устойчивый характер полета РС, заданную точность и исключает возможность возникновения автоколебательных процессов в системе коррекции.

В реальных полевых условиях процесс подготовки РС к запуску включает предварительную запись в блок управления программы имитации траектории полета РС с установкой прогнозируемой скорости ветра. На рис. 2 представлен алгоритм общей программы управления траекторией планирования РС, включая алгоритм выполнения программы имитации траектории. Программа распределяется на два ядра микроконтроллера. Ядро 0 предназначено для записи подпрограммы реализации заданной траектории РС и вывода текущих параметров траектории на Ядро 1, которое предназначено для измерения и записи текущих реальных параметров движения РС и реализации алгоритма управления углом поворота горизонтального оперения (7).

На рис. 2 приняты следующие условные обозначения:

— "МТРС" — подпрограмма реализации заданной траектории РС;

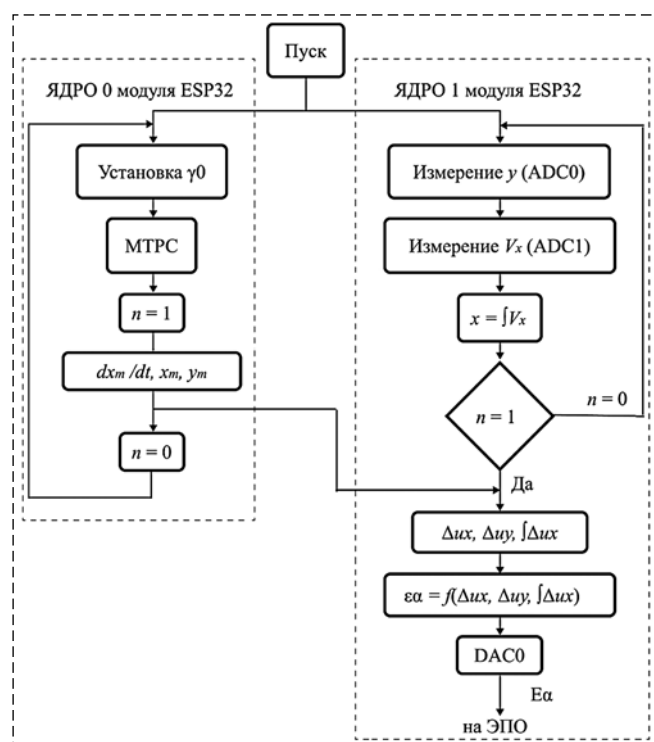


Рис. 2 Алгоритм работы программы записанной на микроконтроллер

Fig. 2. The algorithm of the program recorded on the microcontroller

— " $dx_m/dt, x_m, y_m$ " — вывод: скорости горизонтальной координаты, горизонтальной и вертикальной координат заданной траектории РС;
 — "Измерение y (ADC0)" — измерение текущего значения вертикальной координаты действительной траектории РС;
 — "Измерение V_x (ADC1)" — измерение текущего значения скорости горизонтальной координаты действительной траектории РС;
 — " $[V_x]$ " — вычисление текущего значения горизонтальной координаты действительной траектории РС;

— "DAC0" — вычисление функции $\varepsilon_\alpha = f(\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z)$ в соответствии с выражением (10).

В полевых условиях перед запуском РС для загрузки исполняемой программы в память микроконтроллера ESP32 рекомендуется применять технологию беспроводной загрузки с использованием библиотеки AsyncElegantOTA, поскольку платформа ESP-32, как уже упоминалось, включает надежные Wi-Fi-приемопередатчики.

Компьютерная апробация алгоритма управления планированием реактивного снаряда

На рис. 3 представлена Simulink-модель движения РС в вертикальной плоскости. Блоки 1 и 2 реализовывают уравнения (1), (2) и (5). Блоки 3 и 4 соответствуют уравнениям (3) и (4). Входной параметр V_B для блока 3 определяет прогнозируемую скорость ветра. Вход α_0 блока 4 в дальнейшем будет использоваться для управления углом атаки крыла горизонтального оперения.

Существующая технология запуска РС в полевых условиях предполагает начальную установку угла тангажа γ_0 по справочнику, в котором представлены таблицы зависимости угла γ_0 от измеренных метеопараметров (метеоданных) в районе полета РС, в первую очередь, от средней скорости ветра.

На рис. 4 представлены результаты моделирования запусков РС при отсутствии ветра

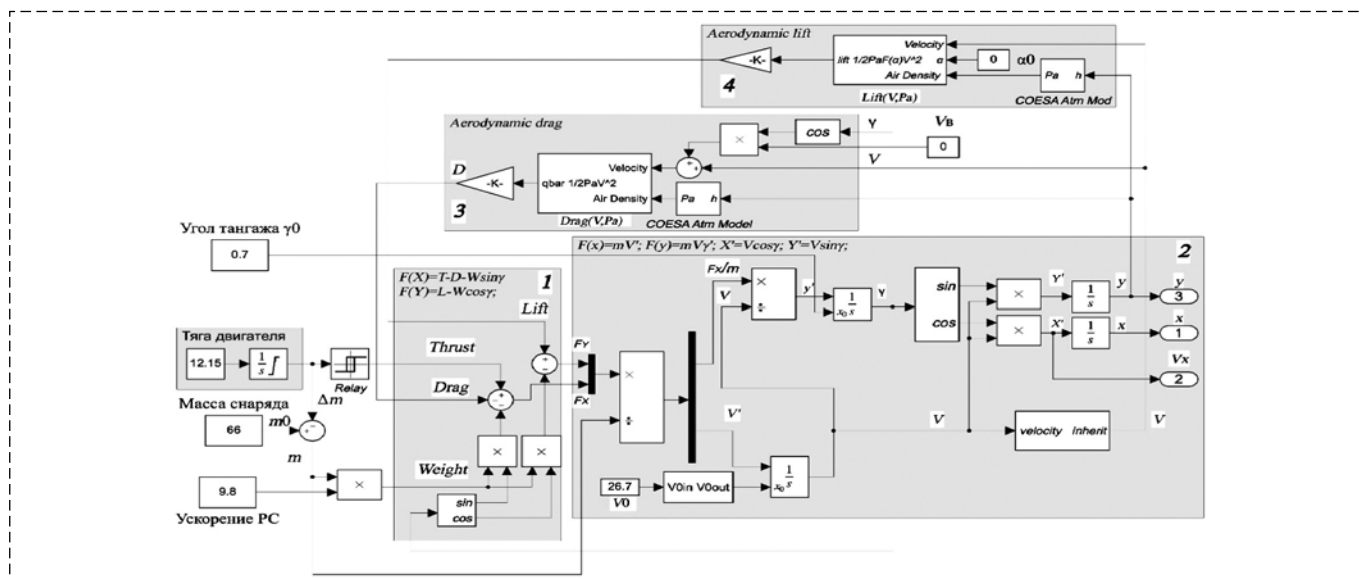


Рис. 3. Simulink-модель движения реактивного снаряда в вертикальной плоскости

Fig. 3. Simulink-model of the movement of a rocket projectile in a vertical plane

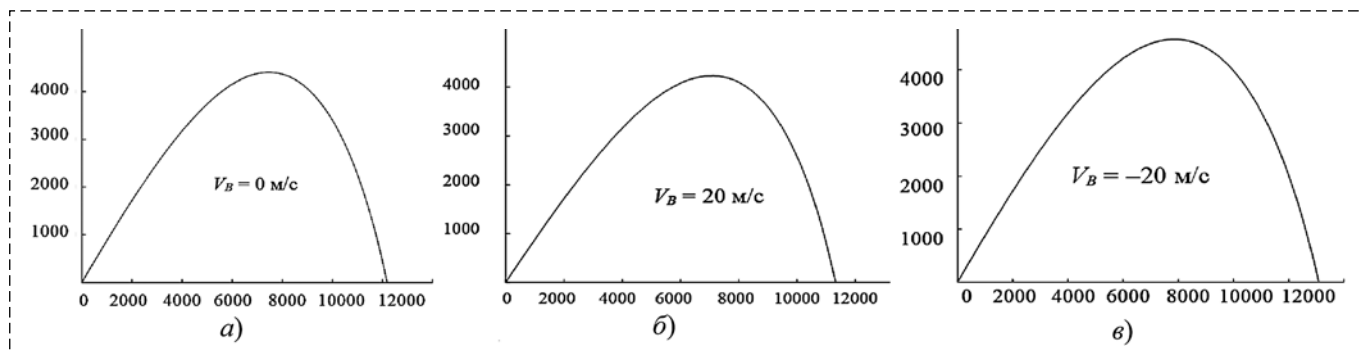


Рис. 4. Результаты моделирования запусков РС при различных скоростях ветра

Fig. 4. Simulation results of rocket launches at different wind speeds

(рис. 4, а), а также при различных скоростях встречного (рис. 4, б — 20 м/с) и попутного (рис. 4, в — -20 м/с) ветров. В данном случае установлен угол тангажа $\gamma_0 = 0,7$ рад [18]. Представленные графики показывают, как значительно отличается дальность полета в этих трех случаях.

Полунатурное моделирование процесса запуска РС в реальном масштабе времени

Технология полунатурного моделирования технической системы предполагает использование при моделировании, наряду с виртуальными элементами, реальных компонентов проектируемой системы. Выбор категории, к которой можно отнести те или иные элементы, определяется задачами, для решения которых используется проектируемая система.

На рис. 5 представлена Simulink-модель, имитирующая запуск и траекторию полета РС с использованием реальной бортовой системы управления планированием на микроконтроллере ESP-WROOM-32.

В качестве объекта управления используется Simulink-модель движения РС (см. рис. 3). Для связи бортовой системы с Simulink-моделью (см. рис. 3) используются программный пакет Simulink Desktop Real-Time, обеспечивающий функционирование модели в реальном масштабе времени, и аппаратный интерфейс на базе многофункциональной платы PCI-1710HG и кабеля с разъемом ADAM-3968 SCSI.

На схеме (рис. 5) штриховой линией обозначен микроконтроллер ESP-32, который через аналоговые-цифровые и цифроаналоговые преобразователи платы PCI-1710HG подключены к Simulink-модели объекта управления.

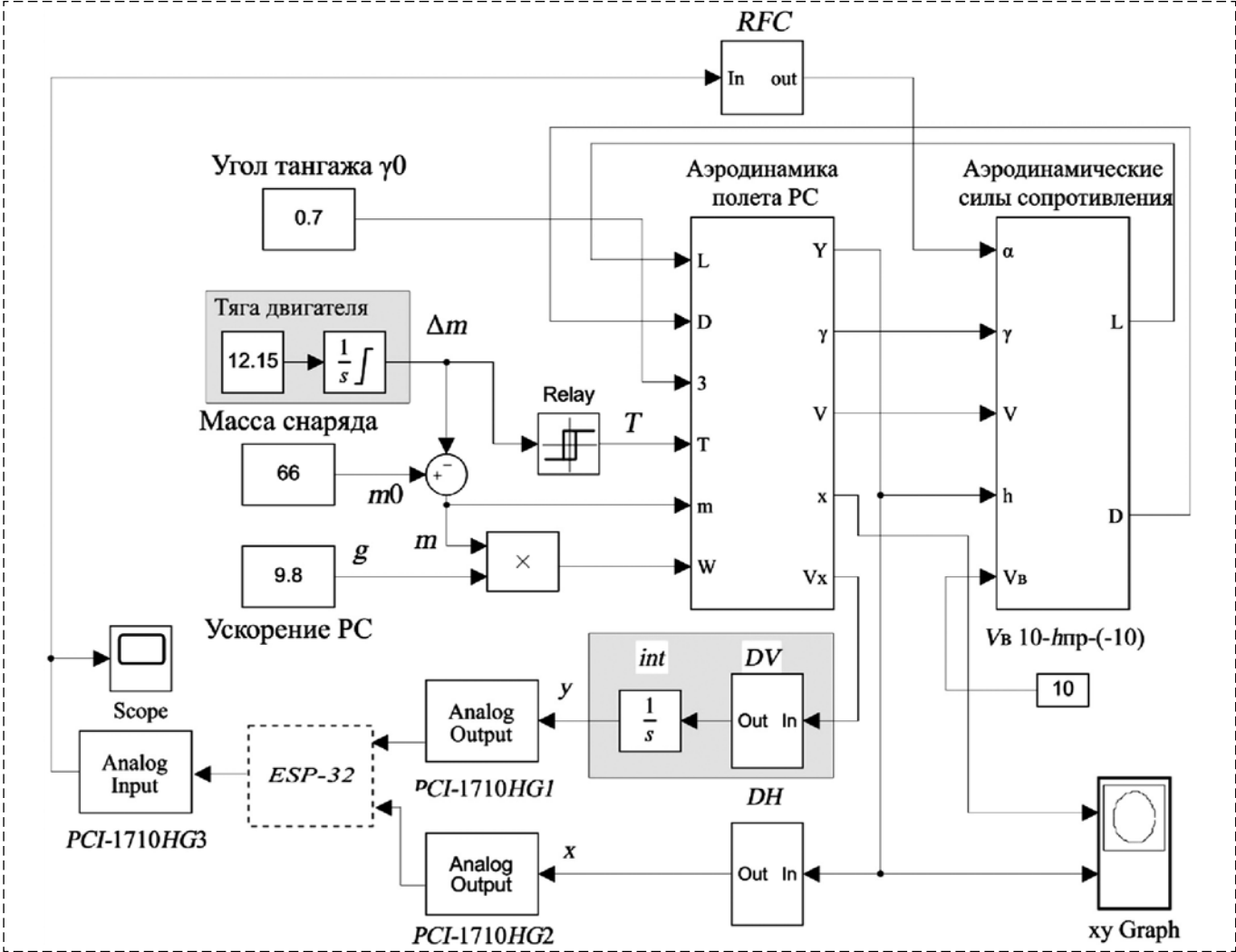


Рис. 5. Simulink-модель имитирующая запуск и полет реактивного снаряда
Fig. 5. Simulink-model simulating the launch and flight of a rocket projectile



Рис. 6. Программно-аппаратный комплекс для настройки бортовой системы управления планированием РС

Fig. 6. Hardware and software complex for setting up the on-board control system for planning a rocket projectile

Входными сигналами для микроконтроллера являются координаты x и y , а выходным — сигнал ε_α , управляющий поворотом горизонтального оперения и углом тангажа α .

Описанная структура полунатурного моделирования была реализована в виде программно-аппаратного комплекса, представленного на рис. 6.

В состав комплекса входят следующие компоненты:

- персональный компьютер;
- многофункциональная плата ввода-вывода PCI-1710HG, которая устанавливается в PCI-разъем компьютера;
- платформа с микроконтроллером ESP-32 (1);
- разъем ADAM-3968 SCSI (2), через который аналоговые входы-выходы подключаются к плате PCI-1710HG;
- осциллограф (3).

В момент запуска процесса моделирования полета РС в системе MATLAB синхронно включается блок управления планированием, выполненный на платформе ESP-32. Блок управления вырабатывает текущие координаты заданной траектории полета РС, запрограммированной в соответствии с измеренной скоростью продольного ветра в условном районе испытаний. Одновременно с этим на микроконтроллер поступают координаты нахождения РС от Simulink-модели через блоки АЦП платы PCI-1710HG. Далее в соответствии с заданным алгоритмом вырабатывается сигнал управления ε_α , который через ЦАП микроконтроллера посту-

пает на осциллограф и на аналого-цифровой вход (Analog Input) платы PCI-1710HG. Далее сигнал управления ε_α поступает через электро-механический привод оперения на вход блока "Аэродинамические силы сопротивления". Изменение угла атаки (при малых углах атаки) приводит к прямо пропорциональному изменению аэродинамической подъемной силы L , что приводит к изменению траектории полета модели РС и минимизации отклонения ее горизонтальной координаты от заданной. На экране виртуального осциллографа 5 и экране реального осциллографа представлен один и тот же сигнал ε_α . На экране компьютера также представлена Simulink-модель 4 в системе MATLAB и результат моделирования на виртуальном осциллографе 6 с демонстрацией полета РС в координатах дальность-высота.

На рис. 7 и в таблице представлены результаты ряда экспериментов по определению дальности полета РС при отклонении скорости ветра от расчетного значения. При отсутствии ветра дальность полета снаряда совпадает с дальностью полета без системы управления планированием, а при ветровых нагрузках снаряд с системой управления имеет более высокую точность попадания.

Дальность полета реактивного снаряда
The range of a rocket projectile

V_B	-20	-10	0	10	20
x (дальность)	12186,3	12185,6	12186,3	12184,3	12186,9

Предложенная структурная модель (см. рис. 1) является основой для компьютерного исследования аэродинамических процессов, описывающих полет РС, оснащенного системой управления планированием. Моделирование неконтролируемого полета РС в вертикальной плоскости в системе Simulink (см.

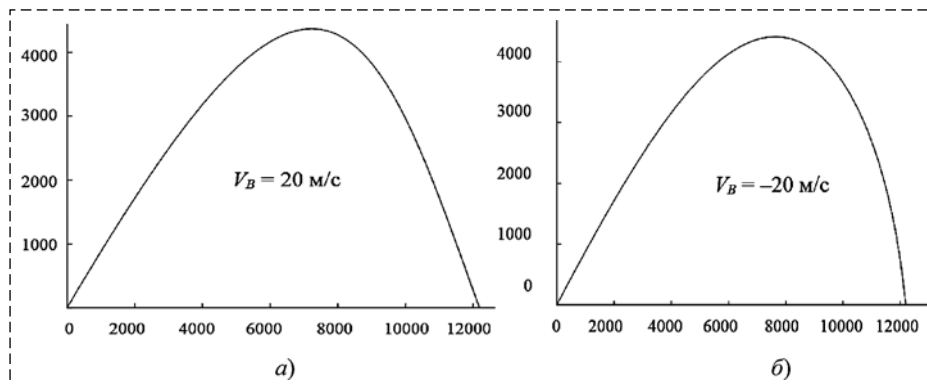


Рис. 7. Дальность полета реактивного снаряда при различной скорости ветра
Fig. 7. The range of a rocket projectile at different wind speeds

рис. 3) с использованием классической системы уравнений (1)–(6) показало, что существенное влияние на дальность полета оказывает неконтролируемое отклонение скорости продольного ветра от расчетного. Изменение скорости на 2 м/с приводит к погрешности до 100 м. В таких условиях приходилось использовать методику проверочных пусков РС, что увеличивало экономические и временные затраты на проведение испытаний в полевых условиях.

Принятый в управлении комбинированный алгоритм, включающий управление высотой полета РС (первый временной этап) и дальностью полета (второй этап), а также придающей системе астатические свойства позволил эффективно управлять углом атаки РС и, в конечном итоге, дальностью полета РС. Программная реализация алгоритма с использованием двухъядерного микроконтроллера со встроенным Wi-Fi-приемником гарантировала высокие качественные и количественные характеристики разработанной системы.

Итогом проведенных исследований явилось создание полунатурной модели полета РС с блоком коррекции (см. рис. 5). Разработанный программно-аппаратный комплекс (см. рис. 6) позволил оценить работу реальной бортовой системы управления планированием РС совместно с компьютерной моделью полета РС в условиях, приближенных к натурным испытаниям.

Применение методики полунатурного моделирования с использованием микроконтроллерного блока управления позволяет принимать полученные результаты испытаний и схемотехнические решения как основу для разработки практической системы коррекции траектории снарядов класса "Град".

Анализ существующих систем коррекции траектории полета РС показал, что все предлагаемые алгоритмы коррекции траектории основаны на достаточно сложных измерениях внешних возмущений и требуют значительной доработки конструкции РС и включения дополнительных компонентов, таких как тормозные системы, отклонения носовой части снаряда, система управления расходом топлива и т. д. Предложенная в данной работе технология коррекции траектории снаряда ограничивается включением в состав системы функционирования снаряда стандартных датчиков и несложной доработкой в виде электромеханической системы поворота горизонтального оперенья.

Заключение

В статье решается задача адаптивного управления траекторией полета РС в условиях параметрической неопределенности. Основой для решения поставленной задачи является разработанная в системе Simulink компьютерная модель полета неуправляемого РС в вертикальной плоскости, базирующаяся на классической системе аэродинамических уравнений пространственного движения снаряда. Проведен ряд экспериментов по определению дальности полета РС в зависимости от внешних и внутренних параметров. Определено, что основное влияние на дальность полета РС оказывает отклонение реальной скорости ветра от прогнозируемой. Для корректирования траектории полета РС предложено использовать вспомогательную систему планирования, управляемую с помощью программного генератора желаемой траектории, выполняющего роль эталонной модели.

Предложен двухэтапный пропорционально-интегральный алгоритм управления планированием РС. Первый этап относится к восходящей траектории полета РС и включает преимущественно слежение за высотой нахождения РС и частично корректирует горизонтальную координату РС, второй этап характеризуется астатическим управлением дальностью полета РС на нисходящей ветви траектории.

Разработан программно-аппаратный комплекс для полунатурного моделирования системы управления планированием РС, включающий компьютерную симуляцию траектории полета РС с заданным отклонением текущей скорости ветра от прогнозируемой и бортовую систему микроконтроллерного управления планирования РС, построенную на микроконтроллере. Результаты проведенных экспериментов показали, что предложенная система управления практически устраняет влияние неконтролируемых отклонений скоростной нагрузки на дальность полета РС.

Итоги полунатурного моделирования подтверждают правильность используемой методики раздельной корректировки выходных координат объекта управления, обеспечивающей асимптотическое сближение выходной горизонтальной координаты к желаемой без перерегулирования. Предложенный комплекс программно-аппаратных средств позволяет использовать беспроводную загрузку программы в микроконтроллер и тем самым ускорить процесс подготовки к запуску РС в полевых условиях.

Список литературы

1. **Реактивная** система залпового огня Военный энциклопедический словарь. Пред. гл. ред. комиссии: С. Ф. Ахромеев. М.: Воениздат, 1986. С. 625—626.
2. **Гурский Б. Г., Лющанов Н. А., Спирин Э. П.** и др. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. С. 240—244.
3. **Lahti J.** Control of exterior ballistic properties of spinstabilized bullet by optimizing internal mass distribution // *Defence Technology*. 2019. N. 15. С. 38—50.
4. **Sun H.** The control of asymmetric rolling missiles based on improved trajectory linearization control method // *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2016. N. 8 (3). P. 319—327.
5. **Lei X. Y.** Analysis of an improved trajectory correction scheme based on mass blocks // *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2019. N. 30 (1). P. 180—190.
6. **Лутманов С. В., Городилов А. Д.** Задача наведения на цель реактивного снаряда в однородном поле тяжести с учетом сопротивления воздуха // *Проблемы механики и управления: нелинейные динамические системы*. 2020. С. 11—29.
7. **Кузнецов Н. С.** Способ коррекции траектории снарядов реактивных систем залпового огня. Патент РФ № 0002678922. 2019. <https://edrid.ru/rid/219.016.b7e0.html>.
7. **Королев С. А., Липанов А. М., Русак И. Г.** Исследование путей повышения дальности стрельбы ствольной артиллерии // *Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2018. № 3 (21) С. 185—191.
9. **Знаменский Е. А., Кэрт Б. Э., Набоков Ю. А.** Обобщенная математическая модель пространственного движения артиллерийских боеприпасов // *Фундаментальные основы баллистического проектирования*. Сер. Библиотека журнала "ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ". 2017. С. 11—14.
10. **Королев С. А.** Методика имитационного моделирования рассеивания снарядов // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2019. № 1 (17). С. 57—62.
11. **Rusyak I., Sufiyanov V., Korolev S., Ermolaev M.** Software complex for simulation of internal and external ballistics of artillery shot // *International Conference on Military Technologies*. University of Defense. 2015. P. 9—17.
12. **Кузнецов Н. С.** Некоторые перспективные направления работ в ОАО "НЛП "Дельта" // *Боеприпасы*. Научно-технический сборник ГНЦ РФ ФГУП "ЦНИИХМ им. Д. И. Менделеева". 2014. С. 9—11.
13. **Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н.** Внешняя баллистика учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2005. С. 543—544.
14. **Бабичев В. В., Ветров В. П.** Способы повышения баллистической эффективности артиллерийских управляемых снарядов // *Известия РАН*. 2010. № 3 (65). С. 3—9.
15. **Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н.** Внешняя баллистика учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2005. С. 120—121.
16. **Андрейченко Д. К., Андрейченко К. П.** К теории автономных систем угловой стабилизации реактивных снарядов залпового огня // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2009. № 3. С. 141—156.
17. **Atygayev T., Ivel V., Gerasimova Y.** Development of a hardware and software model of a rocket motion correction system // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. No. 3 (111). P. 15—23.
18. **Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А.** Адаптивные системы управления: Учеб. пособие. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. С. 105—110.

Synthesis of a Control System for Planning a Rocket Projectile on a Passive Flight Section along a Program-Defined Trajectory

T. B. Atygayev, Postgraduate Student, atgv95@gmail.com, **V. P. Ivel**, Dr. Sc. Tech., Professor, ivelvic@mail.ru, **Y. V. Gerasimova**, PhD, Associate Professor, julyvic@mail.ru, Non-profit limited company "Manash Kozybayev North Kazakhstan university", Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan

Corresponding author: **Atygayev Talgat B.**, Postgraduate Student, Non-profit limited company "Manash Kozybayev North Kazakhstan university", Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan, e-mail: atgv95@gmail.com

Accepted on June 28, 2022

Abstract

The article solves a problem aimed at creating a control system for the planning of a rocket projectile. The existing method of calculating the missile range does not provide the necessary accuracy. The use of computer simulation methods is the most promising approach for the development of a rocket planning control system based on laws. The proposed control system is based on the use of a reference trajectory of the rocket flight calculated for the predicted average values of the velocity of the longitudinal component of the wind. An algorithm for controlling the planning of a rocket by changing the angle of rotation of a horizontal support is proposed, based on the dependence of vertical and horizontal coordinates and on the pitch angle. The computer system of visual programming Simulink was used as a platform for the development of the algorithm. As a result, a block diagram of the rocket planning control was obtained, including a model of the rocket flight path as a control object and an on-board control system organized on the basis of a dual-core ESP-32 microcontroller. The technique of wireless recording of the control program into the memory of the microcontroller in the field is proposed. Based on the Simulink Desktop software package, a half-scale rocket flight model was developed in real time, including an ESP-32 microcontroller, a PCI-1710HG board and a Simulink rocket flight trajectory model with a variable mass in the vertical plane. A series of experiments were conducted that showed a high degree of accuracy of the missile hitting the target because of the projectile planning control system.

Keywords: rocket, control system, microcontroller, ESP-32, reference model, MATLAB, Simulink

For citation:

Atygayev T. B., Ivel V. P., Gerasimova Y. V. Synthesis of a Control System for Planning a Rocket Projectile on a Passive Flight Section along a Program-Defined Trajectory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 536—545.

DOI: 10.17587/mau.23.536-545

References

1. **Multiple** launch rocket system Military Encyclopedic Dictionary. Pred. Gl. red. komissii: S. F. Ahromeev, Moscow, Voenizdat, 1986, pp. 625—626 (in Russian).
2. **Gursky B. G., Lyushchanov N. A., Spirin E. P.** et al. Fundamentals of the theory of control systems for high-precision missile systems, Moscow, BMSTU, 2002, pp. 240—244 (in Russian).
3. **Lahti J.** Control of exterior ballistic properties of spinstabilized bullet by optimizing internal mass distribution, *Defence Technology*, 2019, no. 15, pp. 38—50.
4. **Sun H.** The control of asymmetric rolling missiles based on improved trajectory linearization control method, *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2016, no 8 (3), pp. 319—327.
5. **Lei X. Y.** Analysis of an improved trajectory correction scheme based on mass blocks, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, no. 30 (1), pp. 180—190.
6. **Lutmanov S. V., Gorodilov A. D.** The problem of targeting a jet projectile in a homogeneous field of gravity taking into account air resistance, *Problems of Mechanics and Control: Nonlinear Dynamic Systems*, 2020, pp. 11—29 (in Russian).
7. **Kuznetsov N. S.** Method for correcting the trajectory of missiles of multiple launch rocket systems, Russian Patent No. 0002678922, 2019, <https://edrid.ru/rid/219.016.b7e0.html> (in Russian).
8. **Korolev S. A., Lipanov A. M., Rusyak I. G.** The study of ways to increase the range of barrel artillery shooting, *Bulletin of IzhGTU named after M. T. Kalashnikov*, 2018, no. 3 (21), pp. 185—191 (in Russian).
9. **Znamensky E. A., Carth B. E., Nabokov Yu. A.** Generalized mathematical model of the spatial motion of artillery ammunition, *Fundamental Bases of Ballistic Design. Ser. Library of the journal "VOENMEKH. Vestnik BSTU"*, 2017, pp. 11—14 (in Russian).
10. **Korolev S. A.** Methodology of simulation modeling of projectile dispersion, *Intelligent Systems in Production*, 2019, no. 1 (17), pp. 57—62 (in Russian).
11. **Rusyak I., Sufiyarov V., Korolev S., Ermolaev M.** Software complex for simulation of internal and external ballistics of artillery shot, *International Conference on Military Technologies*, University of Defense, 2015, pp. 9—17.
12. **Kuznetsov N. S.** Some Prospective Areas of Work in JSC "NLP "Delta", *Scientific and Technical Collection of State Scientific Center of the Russian Federation FSUE "D. I. Mendeleev CRIA"*, 2014, pp. 9—11 (in Russian).
13. **Dmitrievsky A. A., Lysenko L. N.** External ballistics textbook for universities, Moscow, Machine Building, 2005, pp. 543—544 (in Russian).
14. **Babichev V. V., Vetrov V. P.** Ways to increase the ballistic efficiency of artillery guided missiles, *Izvestiya RARAN*, 2010, no. 3 (65), pp. 3—9 (in Russian).
15. **Dmitrievskii A. A., Lysenko L. N.** External ballistics textbook for universities, Moscow, Mashinostroyeniye, 2005, pp. 120—121 (in Russian).
16. **Andreychenko D. K., Andreychenko K. P.** To the theory of autonomous systems of angular stabilization of multiple-launch rockets, *Izvestiya RAN. Theory and Control Systems*, 2009, no. 3, pp. 141—156 (in Russian).
17. **Atygayev T., Ivel V., Gerasimova Y.** Development of a hardware and software model of a rocket motion correction system, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, no. 3 (111), pp. 15—23.
18. **Gaiduk A. R., Plaksienko E. A.** Adaptive control systems: textbook, Taganrog, SFU Publishing House, 2018, pp. 105—110 (in Russian).



Юбилейная XXV конференция молодых ученых "НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ" (XXV КМУ2023)

21—24 марта 2023 г., Санкт-Петербург, Россия



Тематика конференции

- Интегрированные и спутниковые системы навигации
- Теория и системы управления
- Обработка информации в навигационных системах
- Электронные и электромеханические устройства систем навигации и управления
- Интеллектуальные системы навигации и управления
- Гироскопические системы
- Чувствительные элементы систем навигации и управления
- Микромеханические датчики, системы и технологии
- Навигация и управление движением
- Новые образовательные технологии в области навигации и управления

Информация для связи:

E-mail: kmu@eprib.ru, kmu_eprib@mail.ru — рабочая группа конференции
<http://www.elektropribor.spb.ru/>
<http://www.elektropribor.spb.ru/nauchnaya-deyatelnost/konferentsii/1863/>

С. С. Лемак, д-р физ.-мат. наук, lemaks2004@mail.ru, **М. Д. Белоусова**, мл. науч. сотр., mb@vrmsu.ru, **В. В. Альчиков**, студент, bestvladi@mail.ru,
НОШ "Фундаментальные и прикладные исследования космоса", МГУ имени М. В. Ломоносова,
НОШ "Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект", МГУ имени М. В. Ломоносова,
МГУ имени М. В. Ломоносова

Задача динамической имитации полета летательного аппарата на робототехническом стенде*

Для обучения пилотов управлению летательными аппаратами используются тренажерные комплексы, включающие в себя стенды для динамической имитации. Данные тренажеры должны создавать для оператора условия, наиболее приближенные к реальным, т. е. имитировать поведение летательного аппарата. В статье рассмотрена постановка задачи динамической имитации для стенда на базе промышленного робота-манипулятора. На концевом эффекторе робота устанавливается кабина с креслом для пилота.

Алгоритмы динамической имитации включают в себя две фазы: фазу имитации движения для пилота и фазу возврата в центр рабочей области с допороговыми значениями перегрузки, когда стенд находится близко к границе рабочей области. При выполнении фазы имитации стенд должен реализовывать такое движение, чтобы угловые ускорения, действующие на человека, и вектор перегрузки, действующий на центр масс человека на стенде, полностью совпадали с реальными, либо, если нет возможности, то чтобы совпадало направление этих векторов. При реализации второй фазы концевая точка стенда должна выполнять возврат в центр рабочей области с допороговыми значениями ускорений, но наиболее быстрым образом. Таким образом мы получаем задачу о переводе стенда из одного положения в другое при наличии ограничений на развиваемые скорости, ускорения и моменты сил. Данная задача может быть представлена как обобщение классической задачи о брахистохроне.

В статье рассмотрено решение задачи о движении материальной точки в однородном поле силы тяжести по кривой, расположенной в вертикальной плоскости, при наличии ограничений на кривизну траектории. Необходимо выбрать форму кривой таким образом, чтобы время спуска было минимальным. Решение этой задачи получено методами оптимального управления, рассмотрены случаи реализации регулярного и особого управлений, изучен вопрос их сопряжения, числа переключений между участками регулярного и особого управлений.

Ключевые слова: динамическая имитация, брахистохрона, оптимальное управление, принцип максимума Понтрягина, особое оптимальное управление

Постановка задачи динамической имитации полета

Для качественного обучения пилотов возникает необходимость использовать различного рода динамические тренажеры, позволяющие проводить обучение пилотов в условиях, наиболее приближенных к реальным. Различные кинематические схемы таких стендов и алгоритмы динамической имитации полета рассмотрены в работах [1, 2].

В качестве перспективного тренажера для пилотов сверхзвукового летательного аппарата (ЛА) предполагается использовать стенд на базе промышленного робота-манипулятора. Схема такого стенда представлена на рис. 1. На концевом эффекторе манипулятора устанавливается кабина с креслом для пилота.

Задача динамической имитации решается в рамках концепции динамической имитации для системы чувствительных масс пилота, находящихся на стенде и в кабине ЛА [2].

Для постановки задачи первой фазы динамической имитации следует рассмотреть одну из основных динамических характеристик движения — вектор перегрузки

$$\vec{n} = \frac{1}{|g_0|}(\vec{w} - \vec{g}),$$

где $|g_0|$ — модуль ускорения свободного падения на экваторе ($9,78 \text{ м/с}^2$); $\vec{g}$ — вектор гравитационного ускорения; $\vec{w}$ — вектор абсолютного ускорения расчетной точки N (чувствительной массы механорецептора пилота).

Пусть известна текущая перегрузка $\vec{n}^P(t)$ расчетной точки N в реальном полете ЛА. Математическая постановка задачи динамической имитации выглядит как определение ускорения концевика стенда $\vec{w}_k(t)$ (соответственно, перегрузки в расчетной точке N) и

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы центра "Сверхзвук" (соглашение 075-15-2022-331).

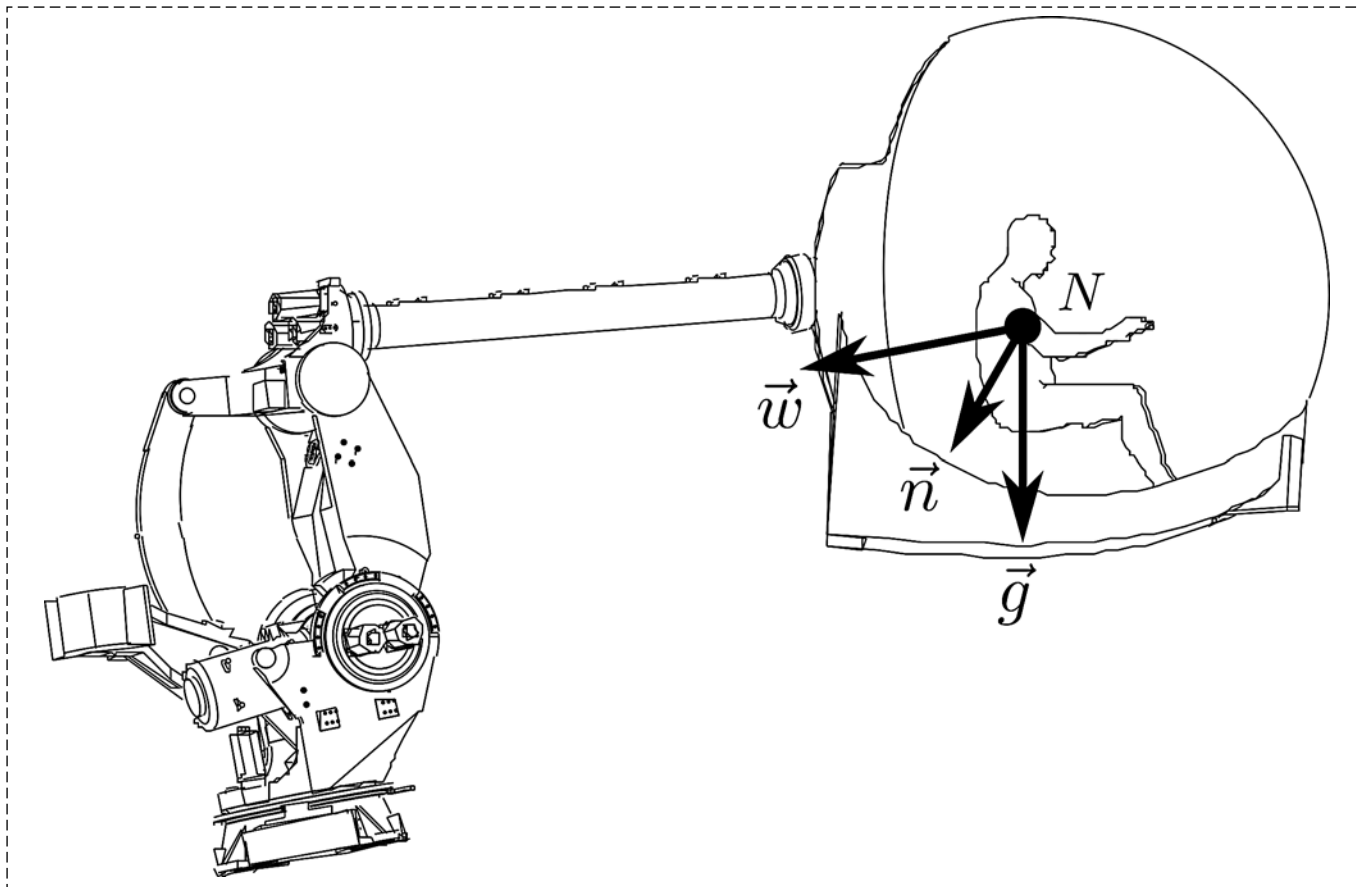


Рис. 1. Динамический стенд на базе промышленного робота-манипулятора

Fig. 1. Dynamic stand based on an industrial robotic arm

квазистационарных углов поворота кабины стенда $\tilde{\chi}(t)$ исходя из решения задачи минимизации критерия

$$\|\bar{n}(N, t) - \bar{n}^P(N, t)\| \rightarrow \min_{\bar{w}_k(t), \tilde{\chi}(t)},$$

где $\bar{n}(N, t)$ — вектор перегрузки в расчетной точке N стенда.

Аналогичная задача может быть сформулирована для имитации угловых ускорений

$$\|\ddot{\chi}(t) - \ddot{\chi}^P(t)\| \rightarrow \min_{\tilde{\chi}(t)}.$$

Если расчетная точка N расположена в центре подвеса кабины, то эти задачи можно разделить.

Для простоты рассмотрим первую задачу — имитации перегрузки при маневрах ЛА в вертикальной плоскости. В силу различного рода ограничений на кинематические и динамические параметры стенда задача динамической имитации может быть решена с приемлемой точностью только для ограниченных маневров ЛА на сравнительно коротком интервале

времени. На фазе собственно динамической имитации концевой эффектор стенда должен находиться в так называемой рабочей области динамического стенда. Рабочая область является некоторым сужением области допустимых положений концевой эффектора манипулятора. На рис. 2 показана область допустимых положений D эффектора для робота-манипулятора *FANUC M2000iA*. Из граничных точек рабочей области манипулятора R (рис. 2) возможно осуществление торможения концевой точки (эффектора) без выхода за рамки допустимых положений стенда D .

Если на первой фазе динамической имитации концевой эффектор выходит на границу рабочей области R (точка B на рис. 2), осуществляется вторая фаза алгоритма динамической имитации — скорейший по времени перевод стенда на множество стартовых положений стенда с допороговыми перегрузками

$$\|\bar{n}(N, t)\| \leq \varepsilon,$$

где ε — порог чувствительности по перегрузке для человека.

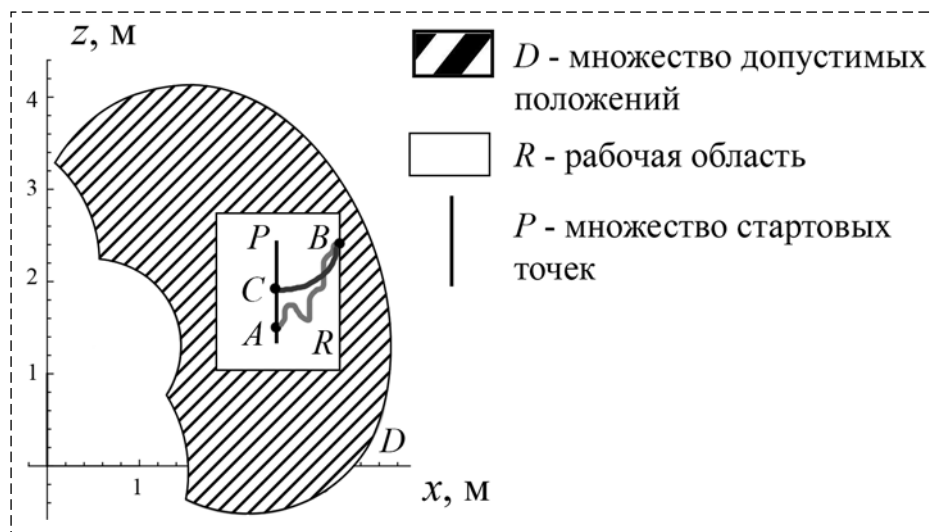


Рис. 2. Множество допустимых положений D конечного эффектора пятого звена манипулятора, его сужение — рабочая область R , вертикальная линия P — множество стартовых точек

Fig. 2. The set of admissible positions D for the manipulator end effector, the set constriction is the work area R , vertical line P is the set of starting points

Таким образом, алгоритм динамической имитации состоит из двух фаз: фазы динамической имитации движения ЛА и фазы возврата на множество стартовых положений конечного эффектора.

Реализация второй фазы алгоритма динамической имитации

Рассмотрим задачу возврата на множество стартовых положений. Множество стартовых положений находится в центре рабочей области и в нашем случае представляет вертикальную прямую P (рис. 2). Для сохранения качества динамической имитации фаза возврата (перевод из точки B в точку C на рис. 2) должна составлять минимально возможный интервал времени. Определив оптимальное движение конечного эффектора, можно вычислить программные движения звеньев манипулятора.

Таким образом, задача возврата сводится к задаче быстрого перевода материальной точки в вертикальной плоскости в поле силы тяжести при наличии ограничений. Данную задачу можно назвать обобщением задачи о брахистохроне.

Классическая постановка задачи о брахистохроне и одно из ее первых решений принадлежат Иоганну Бернулли. Поскольку эта задача и ее различные модификации и обобщения имеют много различных приложений, они представляют большой интерес для исследователей. Так, в работе [3] приведены краткая история ре-

шения классической задачи и некоторая классификация имеющихся ее обобщений. Это и "элементарные" решения, не использующие методы вариационного исчисления и оптимального управления, и задачи о движении частицы в разных силовых полях [4–6], релятивистские обобщения. Рассматривается также брахистохронное движение частицы по поверхности, движение протяженных тел и брахистохрона для системы переменной массы [7].

В работе [8] методами вариационного исчисления решается задача прихода не только из точки в точку, но

и с кривой на кривую. В статье [9] рассматривается пространственная брахистохрона.

Особое внимание уделяется задачам о брахистохроне с трением [3, 10–12]. В работе [3] исследован случай сухого трения как решение изопериметрической вариационной задачи. В работе [10] исследован случай линейного и квадратичного законов трения, в качестве управления рассматривается угол наклона траектории.

В статьях [11, 13] дополнительно предполагается наличие разгоняющей силы, действующей на материальную точку. В качестве управления принимается отношение нормальной составляющей реакции связи R к количеству движения частицы MV .

Существуют работы, изучающие движение протяженных тел вдоль брахистохронной кривой [14, 15]. В частности, в статье [14] рассмотрен случай брахистохронного движения саней Чаплыгина.

В настоящей статье рассмотрены минимальные по времени траектории частицы для случая, когда явно заданы ограничения на кривизну траектории.

Выберем систему координат, совпадающую с трехгранником Френе рассматриваемой кривой.

В качестве управления будем использовать кривизну u траектории частицы. Пусть неподвижная координатная плоскость Oz_1z_2 расположена в вертикальной плоскости и $0 \leq s \leq S$ — длина дуги гладкой регулярной кривой, лежащей в плоскости Oz_1z_2 . Обозначим координаты

единичного вектора касательной $\vec{\tau} = (x_1 \ x_2)^T$, а координаты нормали $\vec{n} = (-x_2 \ x_1)^T$. Обозначим $x_3 = v^2$ — квадрат скорости точки M , а $x_4 = L(s)$, $x_5 = H(s)$ — ее горизонтальную и вертикальную координаты.

Уравнения движения материальной точки единичной массы вдоль кривой следующие:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{ds} &= ux_2; & \frac{dx_4}{ds} &= x_1; \\ \frac{dx_2}{ds} &= -ux_1; & \frac{dx_5}{ds} &= x_2; \\ \frac{dx_3}{ds} &= -2gx_2; & \frac{dx_6}{ds} &= \frac{1}{\sqrt{x_3}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_6(s)$ — текущее время движения точки M .

Краевые условия в (1) следующие:

$$\begin{aligned} x_1(0) &= \cos\theta_0; & x_4(0) &= 0; & x_4(s_k) &= L; \\ x_2(0) &= \sin\theta_0; & x_5(0) &= 0; & x_5(s_k) &= H. \\ x_3(0) &= v_0^2; & x_6(0) &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

Поставим задачу минимизации времени прихода в заданную точку на плоскости Ox_4x_5 :

$$x_6(t_k) \rightarrow \min_{|u| \leq u_m}. \quad (3)$$

Получим решение поставленной задачи, используя необходимые условия оптимальности в виде принципа максимума Понтрягина.

Функция Понтрягина имеет вид

$$\begin{aligned} H &= ux_2\psi_1 - ux_1\psi_2 - 2gx_2\psi_3 + x_1\psi_4 + \\ &+ x_2\psi_5 + \frac{\psi_6}{\sqrt{x_3}} = H_0 + uH_1, \end{aligned}$$

где $H_1 = x_2\psi_1 - x_1\psi_2$, а $H_0 = x_1\psi_4 + x_2(\psi_5 - 2g\psi_3) + \frac{\psi_6}{\sqrt{x_3}}$.

Учитывая условия трансверсальности принципа максимума, запишем сопряженную систему с краевыми условиями на правом конце траектории:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_1}{ds} &= u\psi_2 - \psi_4; & \frac{d\psi_5}{ds} &= 0; \\ \frac{d\psi_2}{ds} &= -u\psi_1 + g\frac{\psi_3}{x_3} - \psi_5; & \frac{d\psi_6}{ds} &= 0; \\ \frac{d\psi_3}{ds} &= g\psi_3\frac{x_2}{x_3^2} + \psi_6\frac{1}{x_3^2}; & \psi_1(s_k) &= 0; \\ & & \psi_2(s_k) &= 0; \\ \frac{d\psi_4}{ds} &= 0; & \psi_3(s_k) &= 0; \\ & & \psi_6(s_k) &= -1. \end{aligned} \quad (4)$$

На экстремальных Понтрягина управление подчиняется условиям:

$$u(s) = \begin{cases} u_m & \text{при } H_1 > 0, \\ u^{\sin} & \text{при } H_1 \equiv 0, \\ -u_m & \text{при } H_1 < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим движение по особой дуге при $s \in [s^*, s^{**}]$.

Здесь выполнены следующие соотношения:

$$H_1 = x_2\psi_1 - x_1\psi_2 = 0; \quad (6)$$

$$\dot{H}_1 = -x_2\psi_4 + x_1(-2g\psi_3 + \psi_5) = 0; \quad (7)$$

$$\ddot{H}_1 = u(x_1\psi_4 + x_2(-2g\psi_3 + \psi_5)) + g\frac{x_1}{x_3^{3/2}} = 0; \quad (8)$$

$$H_0 = x_1\psi_4 + x_2(\psi_5 - 2g\psi_3) + \frac{\psi_6}{\sqrt{x_3}} = 0. \quad (9)$$

Из условий (7) и (8) найдем особое управление

$$u^{\sin} = -g\frac{x_1^2}{x_3^{3/2}\psi_4}. \quad (10)$$

Если $\psi_4 > 0$, условия Келли оптимальности особого управления выполнены. Действительно, подставляя (7) в (9), получим

$$\psi_4 = \frac{x_1}{\sqrt{x_3}} = \text{const} = \frac{\cos\theta^*}{v^*} > 0.$$

Закон изменения особого управления переписывается в виде

$$u^{\sin} = -g\frac{x_1}{x_3}. \quad (11)$$

Подставляя во второе уравнение (1), получим, что на особой траектории

$$\frac{dx_2}{ds} = \frac{\cos\theta^{*2}}{v^{*2}} = g \cdot c^2 = \text{const}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{dx_3}{dx_2} &= -\frac{2}{c^2}x_2; \\ \frac{dx_4}{dx_2} &= \frac{1}{gc^2}\sqrt{1-x_2^2}; \\ \frac{dx_5}{dx_2} &= \frac{1}{gc^2}x_2; \\ \frac{dx_6}{dx_2} &= \frac{1}{gc}\frac{1}{x_1}, \end{aligned} \quad (12)$$

откуда следует уравнение особой кривой на плоскости Ox_2x_3

$$x_3 = \frac{1}{c^2}((x_2^0)^2 - x_2^2) + v_0^2, \quad (13)$$

координаты особой кривой на плоскости Ox_4x_5

$$x_4 = \frac{1}{2gc^2}(x_2\sqrt{1-x_2^2} + \arcsin x_2 - x_2^0x_1^0 - \arcsin x_2^0) + x_4^0; \quad (14)$$

$$x_5 = \frac{1}{2gc^2}(x_2^2 - (x_2^0)^2) + x_5^0. \quad (15)$$

Время движения по особой кривой определяется формулой

$$x_6 - x_6^0 = \frac{1}{2gc}(\arcsin x_2 - \arcsin x_2^0). \quad (16)$$

Рассмотрим модификацию поставленной экстремальной задачи, когда вертикальная координата конечной точки $x_5(s_k)$ не фиксирована.

Получаем задачу о минимуме времени прихода на заданную вертикальную прямую.

В этом случае из условий трансверсальности принципа максимума сопряженная переменная $\psi_5 = 0$, и из равенства (7) получим краевое условие

$$x_2(t_k) = 0. \quad (17)$$

Рассмотрим теперь движение по регулярному участку экстремали Понтрягина, где $u = \text{const}$. В этом случае

$$\frac{dx_3}{dx_1} = -\frac{2g}{u} = \text{const}$$

и

$$x_3 = -\frac{2g}{u}x_1 + v_0^2 + \frac{2g}{u}\cos\theta_0. \quad (18)$$

Координаты регулярной кривой:

$$x_4 = -\frac{1}{u}x_2 + \frac{1}{u}\sin\theta_0; \quad (19)$$

$$x_5 = \frac{1}{u}\sqrt{1-x_2^2} - \frac{1}{u}\cos\theta_0. \quad (20)$$

Оптимальная кривая представляет собой часть окружности

$$\left(x_4 - \frac{1}{u}\sin\theta_0\right)^2 + \left(x_5 + \frac{1}{u}\cos\theta_0\right)^2 = \frac{1}{u^2}.$$

Для того чтобы найти время движения по регулярному участку, сделаем некоторые преобразования. Обозначим

$$v_0^2 + \frac{2g}{u}\cos\theta_0 = \frac{2g}{u}\cos\theta_n.$$

Тогда из (18) получим

$$v^2 = \frac{2g}{u}(\cos\theta_n - \cos\theta).$$

Но $v = \frac{1}{u} \frac{d\theta}{dt}$, следовательно

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 &= 2gu(\cos\theta_n - \cos\theta) = \\ &= 4gu(\sin^2\theta_n/2 - \sin^2\theta/2). \end{aligned}$$

Сделав замену $\sin\theta/2 = \sin\theta_n/2 \cdot \sin\varphi = k\sin\varphi$, получим время движения

$$x_6 = -\text{sign} u \frac{1}{\sqrt{g|u|}}(F(\varphi, k^2) - F(\varphi_0, k^2)), \quad (21)$$

где $F(\varphi, k^2)$ — неполный эллиптический интеграл первого рода.

Рассмотрим структуру оптимального управления в поставленной задаче о брахистохроне. Оптимальная траектория может состоять из участков с регулярным либо особым управлением.

Пусть сначала $g = 0$. Тогда поставленная задача есть вариант задачи о машине Дуббинса: найти на плоскости кратчайший путь, соединяющий две точки. Решение состоит из куска окружности, представляющей регулярный участок, и прямой, представляющей особое решение.

Рассмотрим вопрос сопряжения регулярного и особого участков оптимальной траектории. Пусть в некоторый момент времени t^* попали на особый участок. Рассмотрим проекцию решения на плоскость Ox_2x_3 . Через (x_2^*, x_3^*) обозначим точку сопряжения.

Пусть особая кривая попадает на конечное многообразие $(0, x_3^k)$ и при этом особое управление лежит внутри допустимого интервала управления $[u_{\min}, u_{\max}]$.

Допустим, что на отрезке времени $[t', t'']$ оптимальное решение сошло с особой кривой и вернулось обратно. Поскольку особое решение получено из условия неотрицательности второй вариации функционала, такое решение не может быть лучше по времени, чем при движении по особому участку.

Поэтому сойти с особого участка решение может только если:

- а) особая траектория не попадает на конечное многообразие;
- б) особое управление достигает допустимой границы.

Пример оптимального перехода на заданную вертикальную прямую

Рассмотрим теперь задачу попадания за кратчайшее время на прямую $x_4(t_k) = L$. Будем считать ограничения на управление симметричными $|u_{\min}| = u_{\max} > 0$.

В силу (11) особое управление монотонно растет, потому если в момент сопряжения его значение принадлежит допустимому отрезку, то в дальнейшем это свойство сохраняется. Особая кривая попадает на конечное многообразие, где $x_2(t_k) = 0$.

Поэтому структура решения такова, что на начальном отрезке времени оптимальное управление лежит на границе допустимого отрезка по управлению, а далее — особое решение до момента t_k попадания на конечное многообразие.

Рассмотрим сначала случай, когда ограничения на управление отсутствуют: $u_{\min} = -\infty$. Тогда на всем отрезке времени осуществляется особое управление.

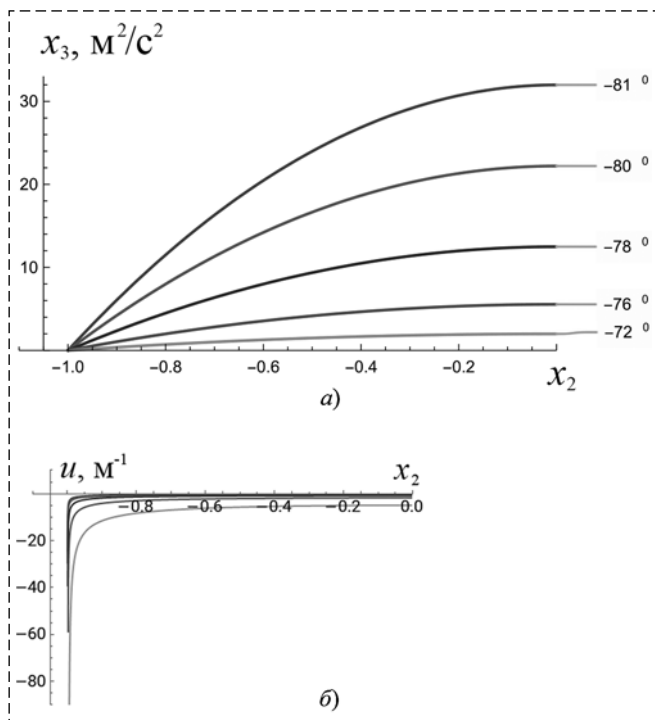


Рис. 3. Особые траектории (а) и особые управления (б)
Fig. 3. Singular trajectories (a) and singular control (b)

На рис. 3 показаны особые траектории и соответствующие им особые управления при фиксированной начальной скорости точки $v_0 = 0,1$ м/с и различных начальных углах наклона траектории $\theta(0)$. Заметна большая чувствительность особой траектории к изменению начального наклона.

Заметим, что наклон траектории и скорость точки на особой дуге связаны интегралом (13). Соответственно, каждому фиксированному положению граничной вертикальной прямой соответствует определенный начальный угол наклона траектории $\theta(0)$. Он определяется из граничного условия $x_4(x_2^k) = L$, где x_4 вычисляется по формуле (14).

Если начальный угол наклона отличается от наклона особой траектории, либо в начальный момент не выполняются ограничения на кривизну, начальный отрезок траектории представляет собой регулярную дугу. Рассмотрим вопрос сопряжения регулярной и особой дуги экстремали Понтрягина на примере.

Пусть заданы параметры экстремальной задачи

$$L = 1 \text{ м}, v_0 = 0,1 \text{ м/с}, \\ \theta_0 = -1,54, u_{\min} = -30,5 \text{ м}^{-1}.$$

В общем случае точку сопряжения регулярного и сингулярного кусков (x_2^*, x_3^*) находим, вычислив корень квадратного уравнения

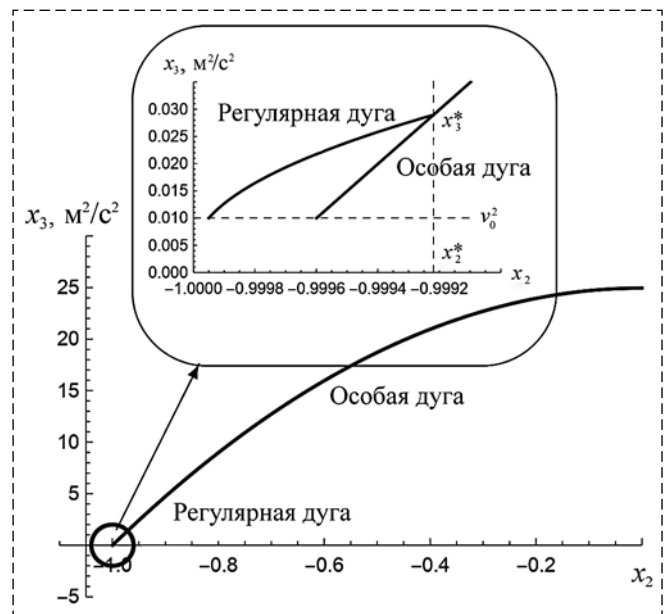


Рис. 4. Сопряжение регулярной и особой дуг оптимальной траектории
Fig. 4. Conjugation of the optimal trajectory regular and singular arcs

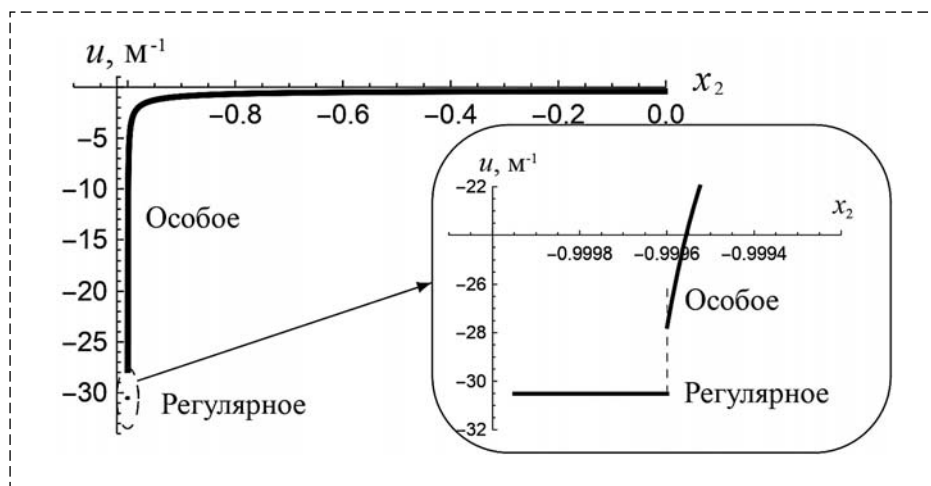


Рис. 5. Оптимальное управление в точке сопряжения

Fig. 5. Optimal control in conjugation point

$$x_1^{*2} + g \frac{(x_1^0)^2}{u_m v_0^2} - (x_1^0)^2 - \frac{(x_1^0)^2}{u_m v_0^2} \frac{g \cos \theta_0}{u_m} = 0,$$

где θ_0 — начальный угол наклона регулярного траектории, а x_1^0 — координата особого куска траектории, соответствующая начальной скорости v_0 .

На рис. 4 показан пример сопряжения на плоскости Ox_2x_3 .

Сопряжения регулярного и особого управлений представлено на рис. 5.

В точке сопряжения управление претерпевает скачок, что соответствует условиям оптимального сопряжения регулярного и особого управлений для особой дуги первого порядка [15].

Как показано выше, параметру L соответствует определенное значение начального угла особой дуги.

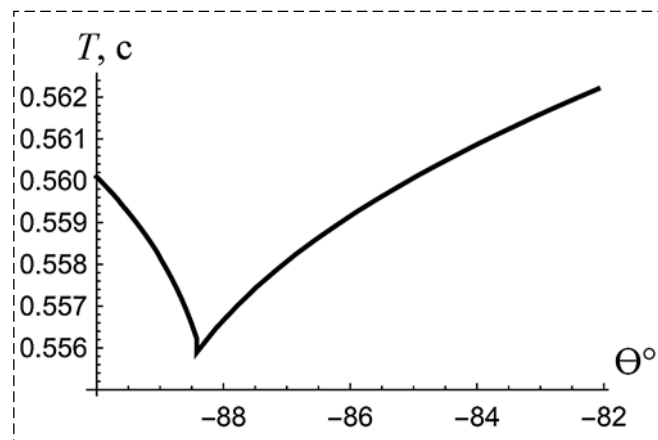


Рис. 6. Оптимальное время движения T в зависимости от начального угла наклона вектора скорости

Fig. 6. Motion time T dependence of initial inclination angle of velocity vector

Проверим, является ли угол наклона θ_0 , соответствующий особому участку, оптимальным с точки зрения общего времени прихода T на терминальное многообразие — вертикальную прямую.

На рис. 6 показано сравнение времени движения по оптимальной траектории для различных начальных углов наклона.

Результаты, представленные на рис. 6, показывают, что начальный наклон траектории $\theta_0 = -88,6^\circ$, соответствующий особому решению, является оптимальным.

Можно показать, что этот результат верен для общего случая. Он следует из принципа максимума Понтрягина. Действительно, изменим начальные условия: сделаем угол наклона начальной скорости точки θ_0 свободным.

Тогда краевое условие на левом конце (2) примет вид

$$x_1^2(0) + x_2^2(0) = 1, x_3(0) = v_0, \\ x_4(0) = x_5(0) = x_6(0) = 0.$$

Из условия трансверсальности на левом конце траектории следуют соотношения

$$\psi_1(0) = 2\lambda_1 x_1(0), \quad \psi_2(0) = 2\lambda_1 x_2(0). \quad (22)$$

Подставив эти значения в выражение (7) для функции H_1 , получим

$$H_1(0) = x_2(0)\psi_1(0) - x_1(0)\psi_2(0) = 0.$$

Это означает, что экстремаль Понтрягина в начальный момент находится на особом участке. Если особый участок является допустимым, то вся экстремаль будет совпадать с особым участком. В этом случае оптимальный начальный угол наклона скорости соответствует наклону на особом участке.

Рассмотрим вопрос о числе переключений на регулярном участке до момента сопряжения с особым участком. Как было показано выше, осуществить сопряжение можно при постоянном управлении, знак которого зависит от того, больше либо меньше начальный наклон наклона на особом участке.

Для решения задачи наибо́льшего по-
падания в точку сопряжения (x_2^*, x_3^*) надо ре-
шить задачу быстрого перехода из началь-
ной точки $(x_2(0), v_0)$ на вертикальную прямую
 $x_2 = x_2^*$. Поскольку второе уравнение систе-
мы (1) отделяется от остальных, смена знака
управления u приводит к увеличению времени
прихода в точку x_2^* .

Заключение

В статье дана постановка задачи динами-
ческой имитации управляемого полета для
тренажера на базе промышленного робота-ма-
нипулятора. Показано, что алгоритм динами-
ческой имитации состоит из двух фаз: ими-
тации перегрузки в рабочей области стенда и
возврата на множество стартовых положений.
Последняя задача может быть представлена
как обобщение задачи о брахистохроне.

Приведено решение задачи о движении ма-
териальной точки по кривой в вертикальной
плоскости в однородном поле силы тяжести при
наличии ограничений на кривизну траектории.
Получено полуаналитическое решение задачи
оптимизации, описана структура сопряжения
регулярного и сингулярного решений и изучен
вопрос числа переключений между участками
регулярного и особого управлений.

Список литературы

1. Alexandrov V. V., Lemak S. S. Algorithms of dynamic piloted flight simulator stand based on a centrifuge with a controlled cardan suspension // Journal of Mathematical Sciences. 2021. Vol. 253, N. 6. P. 768–777.
2. Александров В. В., Воронин Л. И., Глазков Ю. Н., Иш-
линский А. Ю., Садовничий В. А. Математические задачи ди-

намической имитации аэрокосмических полетов. М.: Изд-во
Московского университета, 1995.

3. Сумбатов А. С. Задача о брахистохроне (классифика-
ция обобщений и некоторые последние результаты) // Труды
Московского физико-технического института. 2017. Т. 35.
С. 66–75.
4. Gemmer J., Umble R., Nolan M. Generalizations of the
Brachistochrone Problem // Pi Mu Epsilon Journal. 2011. Vol. 13,
N. 4. P. 207–218.
5. Grimm C., Gemmer J. Weak and Strong Solutions to the
Inverse-Square Brachistochrone Problem on Circular and Annular
Domains // Involve, a Journal of Mathematics. 2016. Vol. 10, N. 05.
6. Vratnagar B., Saje Miran. On the analytical solution of the
brachistochrone problem in a nonconservative field // International
Journal of Non-Linear Mechanics. 1998. Vol. 33, N. 05.
P. 489–505.
7. Гладков С., Богданова С. К теории движения тел
с переменной массой // Вестник Томского Государственного
Университета. 2020. Т. 6, № 65. С. 83–91.
8. Mertens S., Mingramm S. Brachistochrones With Loose
Ends // European Journal of Physics. 2008. Vol. 29, N. 11.
9. Гладков С., Богданова С. К теории пространственной
брахистохроны // Вестник Томского Государственного Уни-
верситета. 2020. Т. 5, № 68. С. 53–60.
10. Cherkasov O. Y., Zarodnyuk A. V. Brachistochrone
problem with linear and quadratic drag and accelerating force // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. Cambridge, 2015. Vol. 6, N. 1. P. 35–44.
11. Вондарухов А. С., Голубев Ю. Ф. Оптимальные траек-
тории в задаче о брахистохроне с сухим трением // Известия
Российской Академии Наук. Теория и системы управления.
2016. С. 11.
12. Wensrich C. Evolutionary solutions to the brachistochrone
problem with Coulomb friction // Mechanics Research
Communications. 2004. Vol. 31, N. 03. P. 151–159.
13. Зароднюк А. В., Черкасов О. Ю. О максимизации
горизонтальной дальности и брахистохроне с разгоняющей
силой и вязким трением // Известия Российской академии
наук. Теория и системы управления. 2017. Т. 4. С. 3–10.
14. Radulovich R., Obradovich A., Salnik S., Mitrovik Z.
The brachistochronic motion of a wheeled vehicle // Nonlinear
Dynamics. 2017. Vol. 87, N. 01.
15. Benham G. P., Cohen C., Brunet E., Clanet C. Brachis-
tochrone on a velodrome // Proceedings of the Royal Society A:
Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2020. Vol. 476.
N. 2238. P. 20200153. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2020.0153>.
16. Габасов Р., Кириллова Ф. М. Особые оптимальные
управления. Москва: Наука, 1973.

To the Problem of Motion Cueing Simulation on a Robotic Stand for Aircraft Flight

S. S. Lemak, lemak2004@mail.ru,

Educational School "Fundamental and Applied Space Research", Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russian Federation,

M. D. Belousova, mb@vrmsu.ru,

Educational School "Brain, Cognitive Systems, Artificial Intelligence", Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russian Federation,

V. V. Alchikov, bestvladi@mail.ru,

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russian Federation

Corresponding author: Belousova M. D., Junior Researcher, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russian Federation, e-mail: mb@vrmsu.ru

Abstract

Various simulators with motion cueing simulation stands, which make it possible to create an acceleration environment for the pilot that is close to a real flight, are used for training aircraft pilots. The article considers the formulation of the motion cueing simulation on a stand based on an industrial manipulator. Motion cueing simulation algorithms include two phases: motion cueing simulation phase and phase of return to the working area center. During simulation phase the stand must implement such a movement that the angular accelerations acting on the person and the overload vector acting on the center of mass of the operator completely coincide with the real ones. If it is not possible then just the directions of these vectors should coincide. During the second phase the stand end point must return to the working area center with acceleration values below the threshold, but in the fastest way. This task can be presented as a generalization of the brachistochrone problem. The article considers the problem of the material point motion in a uniform gravity field along a curve located in a vertical plane, in the presence of restrictions on the trajectory curvature. It is necessary to choose the curve shape in such a way that the descent time is minimal. The problem solution is obtained by optimal control methods, the cases of regular and singular control realization are considered, the question of its conjugation. Also, the switching number between sections of regular and singular control is studied.

Keywords: motion cueing imitation, brachistochrone, optimal control, Pontryagin's Maximum Principle, singular optimal control

Acknowledgements: The work was supported financially by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the program of the Supersonic Center (agreement 075-15-2022-331).

For citation:

Lemak S. S., Belousova M. D., Alchikov V. V. To the Problem of Motion Cueing Simulation on a Robotic Stand for Aircraft Flight, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 546–554.

DOI: 10.17587/mau.23.546-554

References

1. Alexandrov V. V., Lemak S. S. Algorithms of dynamic piloted flight simulator stand based on a centrifuge with a controlled cardan suspension, *Journal of Mathematical Sciences*, 2021, vol. 253, no. 6, pp. 768–777.
2. Alexandrov V. V., Voronin L. I., Glazkov Yu. N., Ishlinskiy A. Yu., Sadovnichiy V. A. Mathematical problems of motion cueing simulation of aerospace flights, Moscow, Moscow University Press, 1995 (In Russian).
3. Sumbatov A. S. The problem on a brachistochrone (classification of generalizations and some recent results), *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, vol. 35, pp. 66–75 (In Russian).
4. Gemmer J., Umble R., Nolan M. Generalizations of the Brachistochrone Problem, *Pi Mu Epsilon Journal*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 207–218.
5. Grimm C., Gemmer J. Weak and Strong Solutions to the Inverse-Square Brachistochrone Problem on Circular and Annular Domains, *Involve, a Journal of Mathematics*, 2016, vol. 10, no. 05.
6. Vratnarić B., Saje Miran. On the analytical solution of the brachistochrone problem in a nonconservative field, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1998, vol. 33, no. 05, pp. 489–505.
7. Gladkov S., Bogdanova S. To the theory of motion of bodies with variable mass, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, vol. 6, no. 65, pp. 83–91 (In Russian), <https://doi.org/10.17223/19988621/58/1>.
8. Mertens S., Mingramm S. Brachistochrones With Loose Ends, *European Journal of Physics*, 2008, vol. 29, no.11.
9. Gladkov S. O., Bogdanova S. B. To the theory of n-dimensional brachistochrone, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika*, vol. 5, no. 68, pp. 53–60 (In Russian).
10. Cherkasov O. Y., Zarodnyuk A. V. Brachistochrone problem with linear and quadratic drag and accelerating, *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace*, Cambridge, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 35–44.
11. Vondrukhov A. S., Golubev Y. F. Optimal trajectories in brachistochrone problem with Coulomb friction, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2016, vol. 55, no. 3, pp. 341–348.
12. Wensrich C. Evolutionary solutions to the brachistochrone problem with Coulomb friction, *Mechanics Research Communications*, 2004, vol. 31, no. 03, pp. 151–159.
13. Zarodnyuk A. V., Cherkasov O. Yu. On maximization of the horizontal range and the brachistochrone problem with an accelerating force and viscous drag, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 4, pp. 553–560.
14. Radulovich R., Obradovich A., Salinik S., Mitrovik Z. The brachistochronic motion of a wheeled vehicle, *Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 87, no. 01.
15. Benham G. P., Cohen C., Brunet E., Clanet C. Brachistochrone on a velodrome, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2020, vol. 476, no. 2238, pp. 20200153. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2020.0153>.
16. Gabasov R., Kirillova F. M. Singular optimal control, Moscow, Science Publishing, 1973 (In Russian).

С. Веиси, аспирант, veisi.saajjad@gmail.com,

В. В. Любимов, д-р техн. наук, доц., vlubimov@mail.ru,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева

Задача сближения двух спутников на орбите методом численного моделирования

Рассматривается задача сближения двух космических аппаратов, находящихся на двух геоцентрических круговых орбитах. Целью сближения космических аппаратов может быть, например, дистанционная зарядка аккумулятора на пассивном космическом аппарате посредством передачи света на солнечные батареи этого аппарата. Высота орбиты пассивного космического аппарата 500 км и высота орбиты маневрирующего космического аппарата в первом рассмотренном случае равна 499,9 км. Задача решается при малом значении угла дальности ($\Delta\vartheta = 0,01^\circ$) между векторами состояния космических аппаратов и при нескольких значениях высоты орбиты маневрирующего космического аппарата ($r_1 = 499,9; 499,8; 499,7$ км). В качестве метода сближения космических аппаратов выбирается метод параллельного сближения с прямым догоном. При этом движение космических аппаратов рассматривается как невозмущенное и допускается, что плоскость сближения совпадает с плоскостью орбиты пассивного космического аппарата. В работе исследуются зависимости параметров сближения космических аппаратов от времени полета.

Ключевые слова: управление космических аппаратов, навигация космических аппаратов, проблема встречи, сближение, круговая орбита

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем развития техники орбитальных полетов является проблема встречи двух космических аппаратов (КА) на орбите. Различным аспектам, связанным с данной проблемой, посвящено множество работ [1–7]. Под встречей понимается выведение двух или более объектов в некоторую относительно малую область космического пространства, сближение объектов и, при необходимости, осуществление между ними физического контакта или конструктивного соединения.

Первое в мире сближение двух пилотируемых кораблей было выполнено 15 декабря 1965 года кораблями НАСА "Джемини-7" и "Джемини-6А". Командир корабля "Джемини-6А" Уолтер Ширра выполнил сближение до расстояния 30 сантиметров. Известно, что 30 октября 1967 года первая в мире полностью автоматическая стыковка двух КА была выполнена в СССР двумя беспилотными космическими кораблями типа "Союз": "Космос-186" и "Космос-188" [8].

Операция встречи КА выполняются с разными целями, например, для транспортировки грузов и экипажей на орбитальную станцию или для уборки космического мусора.

Постановка задачи

Рассматривается задача сближения КА на двух компланарных круговых геоцентрических

орбитах. В частности, данная задача актуальна для дистанционной зарядки аккумулятора на пассивном космическом аппарате (ПКА) посредством передачи светового потока от маневренного КА на солнечные батареи на ПКА. Космические аппараты находятся на близких круговых орбитах относительно Земли, расположенных в единой плоскости, при этом высота орбиты ПКА составляет 500 км и высота орбиты маневрирующего космического аппарата (МКА) в первом рассматриваемом случае исследования равна 499,9 км. В данной работе численно исследуются зависимости от времени параметров сближения, в том числе: расстояние D между МКА и ПКА, скорость $\dot{D}$ сближения, угол q сближения между вектором D и осью x орбитальной системы координат, а также угловая скорость $\dot{q}$ линии визирования, показанные на рис. 1. Численное моделирование выполняется при малом значении угла дальности между векторами расположений КА ($\Delta\vartheta = 0,01^\circ$) и при разных значениях высоты орбиты МКА (при $r_1 = 499,9; 499,8; 499,7$ км). На рис. 1 r_1, r_2 — векторы расположения МКА и ПКА; V_1, V_2 — орбитальные скорости МКА и ПКА; $\Delta\vartheta$ — угол дальности между векторами расположения МКА и ПКА; O' — начало инерциальной системы координат.

При исследовании принимаются следующие допущения:

- задача рассматривается при отсутствии возмущений и в центральном однородном гравитационном поле тяготения Земли;

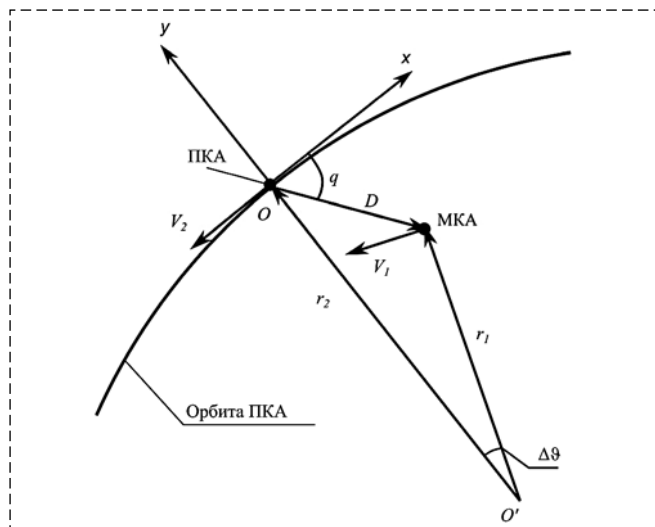


Рис. 1. Схема относительного расположения МКА и ПКА
Fig. 1. The scheme of relative positions of the active and passive spacecraft

- плоскость маневра сближения КА совпадает с плоскостью орбиты ПКА;
- в качестве двигательной установки для коррекции орбиты МКА использует реактивный двигатель с расходом топлива $\dot{m} = 0,1$ кг/с;
- масса МКА — 400 кг.

Метод решения задачи

Для решения поставленной задачи в качестве метода сближения принимаем метод параллельного сближения [9] (рис. 2). При этом используется информация о положении линии визирования.

Метод параллельного сближения является наиболее простым и легко реализуемым. Он

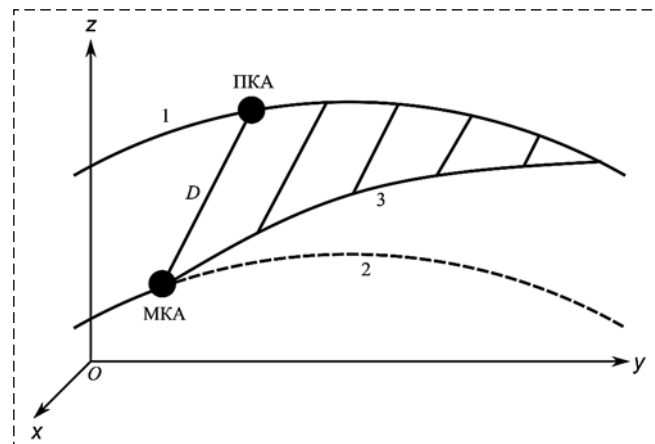


Рис. 2. Схема сближения при идеальном параллельном сближении с прямым догоном
Fig. 2. The approach scheme in the case of an ideal line-of-sight approach

позволяет осуществить полет КА в упрежденную точку встречи. При использовании этого метода вектор относительной дальности $\vec{D}$ в процессе сближения не меняет своего направления в пространстве, а вектор относительной скорости неизменно направлен на ПКА.

Запишем дифференциальные уравнения, описывающие относительное движение МКА и ПКА в системе координат, показанной в рис. 3 [9]:

$$\begin{aligned} \ddot{D} - D\dot{q}^2 - 2\omega D\dot{q} - 3\omega^2 D \sin^2 q &= a_D; \\ D\ddot{q} + 2\dot{D}\dot{q} + 2\omega \dot{D} - 1,5\omega^2 D \sin 2q &= a_q, \end{aligned} \quad (1)$$

где D — модуль вектора относительной дальности; q — угол между вектором D и осью x ; ω — угловая орбитальная скорость пассивного КА; a_D, a_q — проекции вектора управляющего ускорения на линию визирования D и на нормаль к ней.

На рис. 2 D — линия визирования, 1 — орбита ПКА, 2 — опорная орбита МКА, 3 — траектория сближения.

При методе параллельного сближения составляющая a_D будет равна нулю. В результате имеем:

$$\begin{aligned} \ddot{D} - D\dot{q}^2 - 2\omega D\dot{q} - 3\omega^2 D \sin^2 q &= 0; \\ D\ddot{q} + 2\dot{D}\dot{q} + 2\omega \dot{D} - 1,5\omega^2 D \sin 2q &= a_q. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 3 начало системы координат O расположено в центре масс ПКА. Ось y направлена вдоль вектора расположения ПКА r_2 , а ось x перпендикулярна оси y .

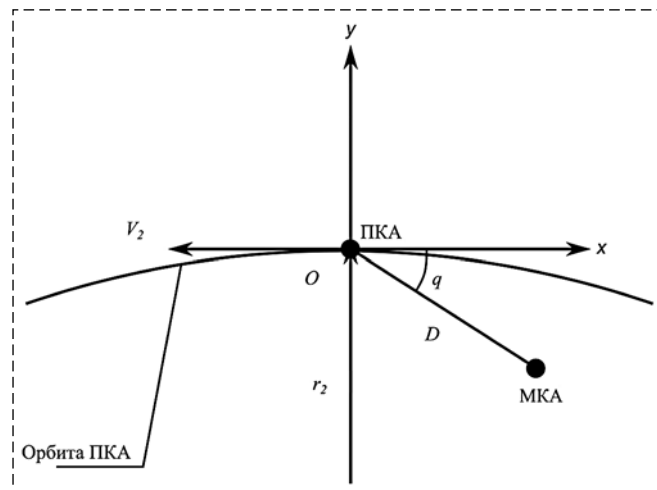


Рис. 3. Система координат, связанная с ПКА
Fig. 3. The coordinate system fixed on the passive spacecraft

Введем в системе (2) следующие обозначения:

$$D(t) = X_1, \quad \dot{D} = X_2, \quad q(t) = Y_1, \quad \dot{q} = Y_2. \quad (3)$$

Запишем систему уравнений (2) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} &= X_2; \\ \frac{dX_2}{dt} &= X_1 Y_2^2 + 2\omega X_1 Y_2 + 3\omega^2 X_1 \sin^2 Y_1; \\ \frac{dY_1}{dt} &= Y_2; \\ \frac{dY_2}{dt} &= \frac{a_q - 2X_2 Y_2 - 2\omega X_2 + 1,5\omega^2 X_1 \sin 2Y_1}{X_1}. \end{aligned} \quad (4)$$

При сближении МКА и ПКА угловая скорость $\dot{q}$ линии визирования должна поддерживаться близкой к нулевому значению с учетом составляющей управляющего ускорения a_q :

$$\begin{aligned} a_q &= -\left(\frac{\dot{m}}{m}\right)V, \\ V &= -V_q, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\dot{m} = -0,1$ кг/с — скорость расхода топлива МКА; $m = 400$ кг — начальная масса МКА. При этом в процессе сближения боковой импульс скорости V в каждый момент времени компенсируется ($V_q(t) = D\dot{q}$), чтобы МКА остался на линии визирования.

Скорость изменения составляющей a_q управляющего ускорения можно описать дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} \frac{da_q}{dt} &= -\left(\frac{\dot{m}}{m}\right)\frac{dV}{dt} = -\left(\frac{\dot{m}}{m}\right)(-\dot{D}\dot{q} - D\ddot{q}) = \\ &= \left(\frac{\dot{m}}{m}\right)(X_2 Y_2 + a_q - 2X_2 Y_2 - \\ &- 2\omega X_2 + 1,5\omega^2 X_1 \sin 2Y_1). \end{aligned} \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений (4) и уравнение (6), описывающее скорость изменения составляющей a_q , решаются численно методом Рунге—Кутты 4-го порядка. В качестве начальных значений принимаем следующие величины:

— начальное расстояние между КА

$$X_1(0) = (x_0^2 + y_0^2)^{1/2}, \quad (7)$$

где x_0, y_0 — координаты начального положения МКА относительно ПКА. Эти значения вычисляем из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} x_0 &= r_1 \sin \Delta\vartheta, \\ y_0 &= -(r_2 - r_1 \cos \Delta\vartheta); \end{aligned}$$

— начальное значение скорости сближения

$$X_2(0) = V \cos \alpha, \quad (8)$$

где V — начальная скорость МКА относительно ПКА; α — угол между вектором относительной скорости и линией сближения (рис. 4):

$$\begin{aligned} V &= (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta\vartheta)^{1/2}, \\ \alpha &= \gamma - \beta, \\ \gamma &= \arccos\left(\frac{V_2^2 - V_1^2 - V^2}{-2V_1 V}\right), \\ \beta &= \arctg\left(\frac{|r_2 \cos \Delta\vartheta - r_1|}{r_2 \sin \Delta\vartheta}\right); \end{aligned}$$

— начальное значение угла q

$$Y_1(0) = \arctg\left(\frac{y_0}{x_0}\right); \quad (9)$$

— начальное значение угловой скорости $\dot{q}$ линии визирования

$$Y_2(0) = \frac{V \sin \alpha}{X_1(0)}. \quad (10)$$

Численные исследования и результаты моделирования

Рассмотрим графики зависимости от времени расстояния D между КА, полученные из решения дифференциальных уравнений относительного движения и скорости изменения управляющего ускорения. Из рис. 5 (см. четвертую сторону обложки) видно, что чем меньше разница высот орбит КА, тем быстрее МКА подлетит к ПКА. При высоте 499,7 км МКА в течение менее 50 с подлетает к ПКА на расстояния меньше 80 метров, которое достаточно для выполнения зарядки аккумулятора ПКА.

При этом для достижения необходимого расстояния для зарядки аккумулятора надо проводить корректировку орбиты сближения импульсом тяги, чтобы поддерживать заданное расстояние. Из рис. 5 следует, что в случае невыполнения коррекции орбиты МКА удаляется на значительное расстояние от ПКА.

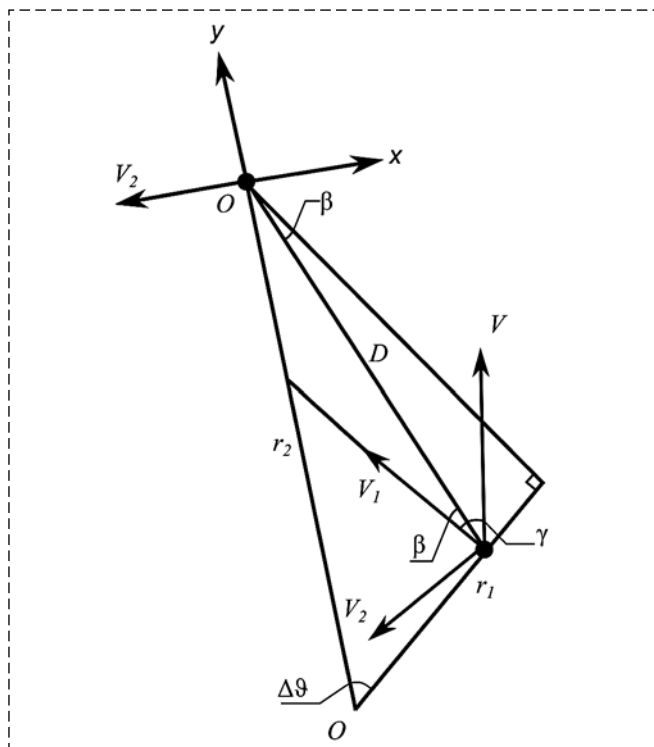


Рис. 4. Схема относительной скорости и угла между векторами относительной дальности и относительной скорости

Fig. 4. The scheme of the relative velocity and the angle between the relative state vector and the relative velocity

Рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) показывает, что скорость сближения $\dot{D}$ увеличивается при уменьшении расстояния между орбитами КА.

Из рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) следует, что при высоте орбиты МКА, равной 499,9 км, угол q совершает малые колебания относительно значения -5° . При уменьшении расстояния между орбитами КА начальное значение угла q уменьшается и до определенного момента времени совершает колебания. При этом, начиная с некоторого момента времени, угол q эволюционирует, и МКА удаляется от ПКА.

На рис. 8 (см. четвертую сторону обложки) показано, что угловая скорость $\dot{q}$ является близкой к нулю (при невозмущенном сближении двух КА в случае использования МКА круговой орбиты с высотой 499,9 км). При этом угловая скорость $\dot{q}$ имеет малые колебания. При остальных двух значениях высоты орбиты МКА угловая скорость в определенный момент времени резко меняется и далее постепенно стабилизируется при значении $-0,1^\circ/\text{с}$. При этом МКА удаляется от ПКА.

Из рис. 9 (см. четвертую сторону обложки) видно, что в определенный период времени

значение управляющего ускорения a_q увеличивается быстрее при меньшем начальном расстоянии между КА. При этом сближение выполняется быстрее, и оно требует меньше расхода рабочего тела.

Анализируя рис. 5, можно предположить, что при рассмотренных значениях высоты орбиты МКА (499,9, 499,8, 499,7 км) время выполнения сближения, соответственно, составляет 250, 90, 40 с. Если сравнить значения a_q в эти моменты времени, то получаем, что при выборе значения высоты МКА 499,7 км сближение осуществляется за меньшее время.

Заключение

В данном исследовании рассмотрена задача сближения двух КА для дистанционной зарядки аккумулятора на ПКА посредством передачи света на солнечные батареи ПКА от источника света на МКА. В качестве метода решения задачи применяется метод параллельного сближения с прямым догоном. В работе были получены численные решения дифференциальных уравнений относительного сближения и дифференциального уравнения, описывающего изменение управляющего ускорения. При этом были исследованы следующие зависимости от времени параметров сближения: расстояния D между КА, скорости сближения $\dot{D}$, угла сближения q между линией визирования и осью x системы координат, и угловой скорости $\dot{q}$ линии визирования.

Анализируя построенные графики зависимостей параметров от времени в рамках выбранных значений высоты опорной орбиты МКА, можно сделать следующие выводы:

1. При меньшей разности высот орбит МКА и ПКА сближение КА выполняется быстрее, что способствует уменьшению затрат рабочего тела.
2. При меньшей разности высот орбит МКА и ПКА расстояние между КА при сближении достигает наименьших значений.
3. После достижения необходимого расстояния для зарядки аккумулятора надо корректировать орбиту сближения импульсом тяги, чтобы поддержать это расстояние. В случае невыполнения коррекции орбиты сближения МКА после прохождения точки с наименьшим расстоянием от ПКА в дальнейшем наблюдается удаление МКА от ПКА.

Список литературы

1. Старинова О. Л., Сомов Е. И., Бутырин С. А. Управление движением космического робота при выведении и сближении с геостационарным спутником // Навигация и управление движением. 2020. С. 107–108.
2. Орловский И. В., Михайлов М. В., Рожков С. Н., Аванесов Г. А., Жуков Б. С. Сближение и причаливание космических аппаратов по измерениям аппаратуры спутниковой навигации, совмещенной с оптической подсистемой причаливания // Космическая техника и технологии. 2021. Т. 33, № 2. С. 88–97.
3. Дубанов А. А. Моделирование траектории преследователя в пространстве при методе параллельного сближения // Программные системы и вычислительные методы. 2021. № 2. С. 1–10.
4. Chen T., Xu S. Double line-of-sight measuring relative navigation for spacecraft autonomous rendezvous // Acta Astronautica. 2010. Vol. 67, Iss. 1–2. P. 122–134.

5. Li P., Zhu Z. H. Line-of-sight nonlinear model predictive control for autonomous rendezvous in elliptical orbit // Aerospace Science and Technology. 2017. Vol. 69. P. 236–243.
6. Alpern S. Line-of-sight rendezvous // European journal of operational research. 2008. Vol. 188, N. 3. P. 865–883.
7. Hematulin W., Kamsing P., Torteeka P., Somjit T., Phisannupawong T., Jarawan T. Multiple-Unmanned Air Vehicle Trajectory Optimization during Close-Approach Boundary based on Line-of-Sight Technique // Innovation Aviation & Aerospace Industry — International Conference. 2021. P. 1–4.
8. Darling D. The complete book of spaceflight: From Apollo 1 to zero gravity. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
9. Иванов Н. М., Лысенко Л. Н. Баллистика и навигация космических аппаратов: учебник для вузов. М.: МГТУ им. Баумана, 2016. 523 с.
10. Noton M. Spacecraft navigation and guidance. Springer science and business media, 2012.

The Rendezvous Mission of Two in-Orbit Sattelites Using Numerical Simulation

S. Veisi, veisi.saajjad@gmail.com, V. V. Lyubimov, vlyubimov@mail.ru,
Samara National Research University, Samara, 443086, Russian Federation

Corresponding author: V. V. Lyubimov, Dr. of Tech. Sc., Associate Professor,
Samara National Research University, Samara, 443086, Russian Federation, e-mail: vlyubimov@mail.ru

Accepted on May 25, 2022

Abstract

In this work, a rendezvous of two satellites is considered. The active satellite approaches the passive satellite for a remote partial recharge of the passive spacecraft's dead battery. In the first case, the active and passive spacecraft are in geocentric circular orbits, having an altitude of 499.9 km and 500 km, respectively. It is assumed that the rendezvous is unperturbed and the rendezvous plane coincides with the plane of the passive satellite's orbit. Close-range guidance starts as soon as the sensor on the active spacecraft recognizes the passive spacecraft. A method implementing the line of sight is used for the close-range guidance process. A mathematical model of the relative motion is formed and numerically solved to investigate the rendezvous parameters against time. For solving the model, different values of 499.9, 499.8, 499.7 km are considered as the initial orbit altitude of the active spacecraft, assuming that the angle between state vectors of the spacecraft has a small value of 0.01 degrees. The results show that the active spacecraft with an initial altitude of 499.7 km approaches the passive spacecraft to a distance of 80 meters in less than 50 seconds, where a final velocity impulse is needed to maintain this distance.

Keywords: spacecraft control, spacecraft navigation, rendezvous mission, rendezvous, circular orbit

For citation:

Veisi S., Lyubimov V. V. The Rendezvous Mission of Two in-Orbit Sattelites Using Numerical Simulation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 555–559.

DOI: 10.17587/mau.23.555-559

References

1. Starinova O. L., Somov Y. I., Butyrin S. A. Motion control of a space robot during the launch and approach to a geostationary satellite, *Navigation and motion control*, 2020, pp. 107–108 (in Russian).
2. Orlovskiy I. V., Mikhailov M. V., Rozhkov S. N., Avanesov G. A., Zhukov B. S. Spacecraft rendezvous and docking using measurements from satellite navigation equipment combined with the optical subsystem for final approach, *Space engineering and technology*, 2021, vol. 33, no. 2, pp. 88–97 (in Russian).
3. Dubanov A. A. Modeling of the interceptor's trajectory in the space using the parallel approach method, *Software systems and computational methods*, 2021, no. 2, pp. 1–10 (in Russian).
4. Chen T., Xu S. Double line-of-sight measuring relative navigation for spacecraft autonomous rendezvous. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, iss. 1–2, pp. 122–134.

5. Li P., Zhu Z. H. Line-of-sight nonlinear model predictive control for autonomous rendezvous in elliptical orbit, *Aerospace Science and Technology*, 2017, vol. 69, pp. 236–243.
6. Alpern S. Line-of-sight rendezvous, *European journal of operational research*, 2008, vol. 188, no. 3, pp. 865–883.
7. Hematulin W., Kamsing P., Torteeka P., Somjit T., Phisannupawong T., Jarawan T. Multiple-Unmanned Air Vehicle Trajectory Optimization during Close-Approach Boundary based on Line-of-Sight Technique, *Innovation Aviation & Aerospace Industry — International Conference*, 2021, pp. 1–4.
8. Darling D. *The complete book of spaceflight: From Apollo 1 to zero gravity*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2003.
9. Ivanov N. M., Lysenko L. N. Ballistics and Navigation of spacecraft: a book for university students, Moscow, Publishing house of BMSTU, 2016, 523 p. (in Russian)
10. Noton M. *Spacecraft navigation and guidance*, Springer science and business media, 2012.



Научно-практическая конференция

"ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ДЕЙСТВИЙ ВОЙСК И ПРОЦЕССОВ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ" ("ИМСВН-2022")

Вторая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в военной сфере "Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения" ("ИМСВН-2022") состоится в Санкт-Петербурге 20 октября 2022 года в Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва.

Организаторы и учредители конференции:

Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва, Санкт-Петербург;

Некоммерческое партнерство "Национальное общество имитационного моделирования (НП "НОИМ"), Санкт-Петербург;

АО "Центр технологии судостроения и судоремонта", Санкт-Петербург;

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН.

Задачами конференции являются:

- обмен опытом исследований и практических приложений средств имитационного и комплексного (системного) моделирования сложных организационно-технических систем и процессов в военной сфере;
- распространение методов и средств имитационного моделирования для решения научных и практических задач управления войсками и оружием, в том числе совместно с технологиями искусственного интеллекта;
- определение перспектив деятельности научных, научно-исследовательских и образовательных организаций, предприятий промышленности в имитационном моделировании процессов вооруженной борьбы и их всестороннего обеспечения;
- распространение опыта обучения теории и практике имитационного моделирования в военной сфере.

Научная программа конференции включает следующие тематические направления:

- применение имитационного моделирования для принятия решений по управлению войсками и оружием, в том числе совместно с технологиями искусственного интеллекта;
- применение имитационного моделирования на различных этапах жизненного цикла комплексов вооружения, военной и специальной техники;
- теоретические основы и методология имитационного моделирования действий войск и процессов их всестороннего обеспечения;
- инструментальные средства автоматизации и визуализации имитационного моделирования объектов и процессов в военной сфере;
- применение имитационного моделирования в обучении военных специалистов.

Своевременно направляйте докладыв секретариат конференции по электронному адресу imsvn2022@simulation.su.

Официальный сайт конференции ИМСВН-2022 — www.simulation.su.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

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

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

Сдано в набор 25.07.2022. Подписано в печать 14.09.2022. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Заказ МН1022. 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