

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 19
2018
№ 7

Рисунки к статье С. Л. Зенкевича, Хуа Чжу, Мэйсинь Чжай
 «ОДИН СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНКИ СГЛАЖИВАНИЯ ФАЗОВОГО
 ВЕКТОРА В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СТРОЯ»

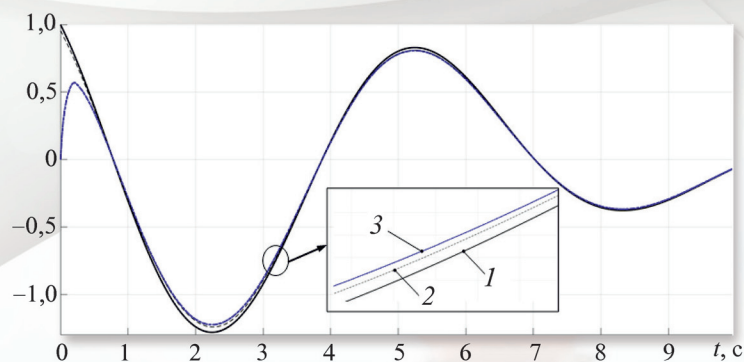
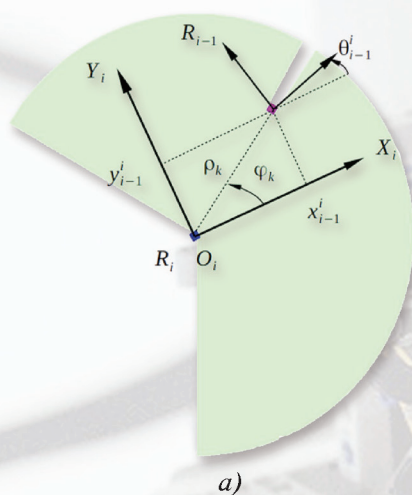
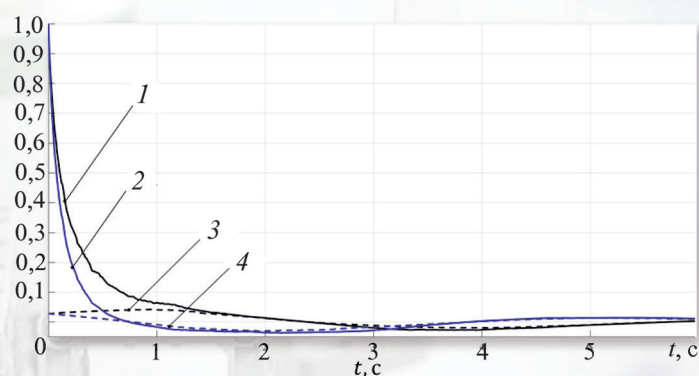


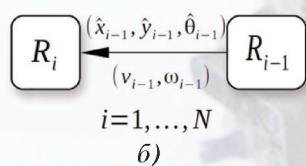
Рис. 3. Фазовая координата $\phi(t)$:
 1 — истинное значение координаты $\phi(t)$; 2 — оценка сглаживания;
 3 — оценка фильтрации

Рис. 4. Ошибки оценки фазовых координат:
 1 — ошибка оценки фильтрации координаты $\phi(t)$; 2 — ошибка оценки фильтрации координаты $\dot{\phi}(t)$; 3 — ошибка оценки сглаживания координаты $\phi(t)$; 4 — ошибка оценки сглаживания координаты $\dot{\phi}(t)$



а)

Обмен информацией



$i=1, \dots, N$
 б)

Рис. 5. Локальная окрестность робота R_i (а); обмен информацией между роботами (б)

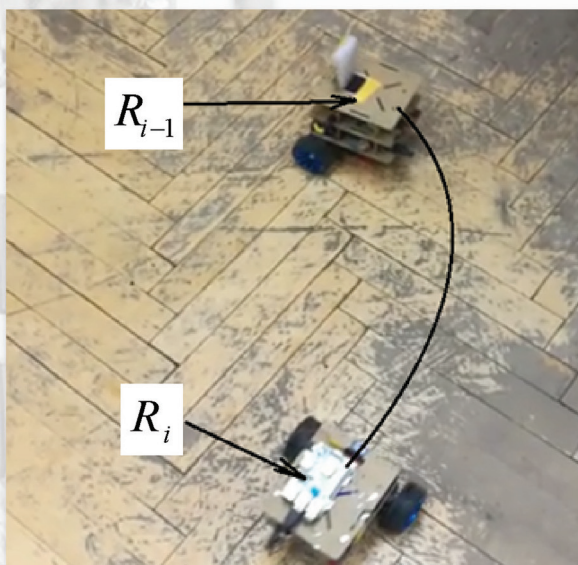


Рис. 6. Робот R_{i-1} и R_i

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 19

2018

№ 7

Издается с ноября 2000 года

ISSN 1684-6427

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.

Международный редсовет:

DANIELE Z., PhD, Италия

DORANTES D. J., PhD, Китай

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

ТРОФИМЕНКО Е. Е., д.т.н., Беларусь

Российский редсовет:

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

ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН

МИКРИН Е. А., 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:

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., 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.

ПАВЛОВСКИЙ В. Е., 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.п.с.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

ЮРЕВИЧ Е. И., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Filaretov V. F., Yukhimets D. A. The New Strategy of Designing Tracking Control Systems for Dynamical Objects with Variable Parameters 435

Гулай А. В., Зайцев В. М. Цифровой контроль тенденций изменения сенсорных параметров в интеллектуальных системах 442

Колосов О. С., Короленкова В. А., Пронин А. Д., Зуева М. В., Цапенко И. В. Построение амплитудно-частотных характеристик сетчатки глаза и формализация их параметров для использования в системах диагностики 451

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Зенкевич С. Л., Хуа Чжу, Мэйсинь Чжай. Один способ получения оценки сглаживания фазового вектора в задаче управления движением строя 458

Галемов Р. Т., Масальский Г. Б. Комбинированный поисковой метод решения обратной задачи кинематики многозвенного манипулятора 464

Грязин Д. Г. Вопросы создания восполняемых источников энергии морских автономных подводных роботизированных комплексов 474

Досаев М. З., Селюцкий Ю. Д., Е. Ч. С., Су Ф. Ч. Моделирование тактильной обратной связи, реализуемой с помощью пьезоэлектрического привода 480

Ивойлов А. Ю., Жмудь В. А., Трубин В. Г. Методика определения параметров двигателя постоянного тока 486

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 БД RSCI на платформе Web of Science.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 19
2018
No. 7

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

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.

International Editorial Board:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DANIELE Z., PhD, Italy

DORANTES D. J., PhD, China

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

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

Russian 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.

LEONOV G. A.

MIKRIN E. 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:

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.

PAVLOVSKY V. E.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

YUREVICH E. I.

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

- Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** The New Strategy of Designing Tracking Control Systems for Dynamical Objects with Variable Parameters 435
- Gulay A. V., Zaitsev V. M.** Digital Control of Tendencies of Sensor Parameters Changing in Intelligent Systems 442
- Kolosov O. S., Korolenkova V. A., Pronin A. D., Zueva M. V., Tsapenko I. V.** Obtaining the Amplitude-Frequency Response of the Retina and Formalization of its Parameters for Using in Diagnostic Systems 451

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Zenkevich S. L., Zhu Hua, Zhai Meixin.** One Way to Obtain the Smoothed Estimate of Phase Vector in the Task of Motion Control of Convoy Robots 458
- Galemov R. T., Masalsky G. B.** Hybrid Search Method for Solving the Inverse Kinematics of a Multilink Manipulator 464
- Gryazin D. G.** The Issues of Development of Renewable Energy Sources for Marine Autonomous Underwater Robotic Complexes 474
- Dosaev M. Z., Selyutskiy Yu. D., Yeh C.-H., Su F.-C.** Modeling Tactile Feedback Realized by Piezoelectrical Actuator 480
- Ivoilov A. Yu., Zhmud V.A., Trubin V. G.** The Technique of the Direct Current Motor Parameters Determination 486

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

V. F. Filaretov, D. Sc., Head of Laboratory, Head of Department, filaret@iacp.dvo.ru,

D. A. Yukhimets, D. Sc., Senior Researcher, undim@iacp.dvo.ru,

Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok, Far Eastern Federal University, Vladivostok

The New Strategy of Designing Tracking Control Systems for Dynamical Objects with Variable Parameters¹

In this paper, the new strategy of controlling complicated dynamical objects with variable or unknown parameters during their movement along smooth spatial trajectories is proposed. The proposed strategy is based on correcting program signals that define the movement of this object depending on accurate dynamical-object movement. Using this strategy considers the variance of dynamical object parameters and increased accuracy of their movement when typical linear controllers are used. The simulations and experimental researches confirmed the workability and efficacy of the proposed strategy.

Keywords: control theory, tracking systems, mobile robot control, accuracy, design systems, dynamic object, motion control systems

1. Introduction

There are three basic strategies used for controlling different dynamical objects (DOs) in tracking mode: the feedback strategies [1], the invariance principle [2], and the strategy of joint nominal and local control. However, using these known strategies often does not solve the task of accuracy control by means of simple controllers for a new class of complex multiconnected systems with variable and unknown parameters (underwater vehicles and multilink manipulators).

The generalized structure diagram of a tracking system with n control channels and using of the feedback strategy is presented in Fig. 1, and the following notation is used in this diagram: DO is the dynamical object, MCU represents the main control units installed in each control channel, FBS represents the feedback sensors, and $X_B(t)$, $X^*(t)$, $\varepsilon(t)$, $u(t) \in R^n$, where $\alpha(t)$ is the vector of controlled coordinates, $X^*(t)$ is the vector of desired (program) values of these coordinates, $\varepsilon(t) = X^*(t) - X_B(t)$ is the vector of errors in corresponded control channels, and $u(t)$ is the vector of control signals. To reach the high control accuracy in the schema pre-

sented in Fig. 1, the controllers with transfer function $W_k(s)$ similar to $k/W_{ok}(s)$ should be entered in each control channel. Here $W_{ok}(s)$ is the transfer function of DO, k is the large gain, and s is the Laplace operator. However, the transfer function $k/W_{ok}(s)$ cannot be implemented, as all real DO has reduced frequency response, and larger values of k decreases the stability of the system. Furthermore, if the frequency and amplitude of $X^*(t)$, which approach harmonic signals, is increased, then the values $\varepsilon(t)$ increases as well while considering the limited bandwidth of DO even when adaptive controllers are used.

It can provide the robustness of quality parameters of system working by means of the invariance principle (two-channel control) [2]. The generalized diagram that implements this strategy is shown in Fig. 2. In this diagram, the ACU are the additional control units with transfer functions $W_{ak}(s) = 1/(W_{ok}(s)W_k(s))$ that enter in each con-

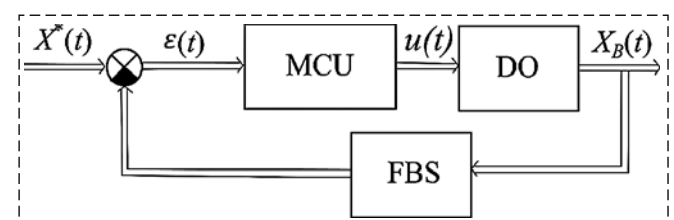


Fig. 1. The generalized structural diagram of the tracking system

¹The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants 16-29-04195, 17-57-45055).

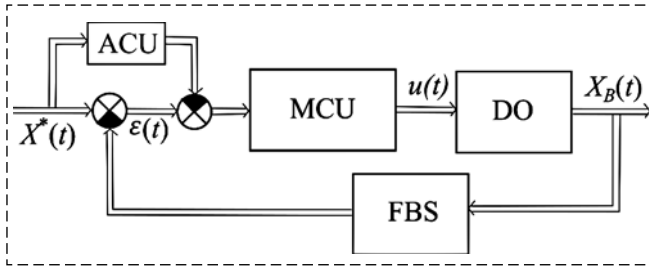


Fig. 2. The generalized diagram of implementing the invariance principle

trol channel. However, the transfer function $W_{ak}(s)$ cannot be implemented exactly because of the reason described earlier in the introduction. Thus, it is impossible to provide precise invariance of quality parameters to different external unknown and variable influences.

The third known strategy of local, global, and adaptive control [3, 4] can be used for controlling complex multiconnected DO (multilink manipulators and underwater vehicles) with variable and unknown parameters. The generalized schema of implementation of this strategy is presented in Fig. 3, where $U_g(t) \in R^n$ is the vector of global control.

The general idea of this strategy is to calculate the signal for movement of DO for each control channel (manipulator of underwater vehicle) at corresponding coordinates while considering its dynamic properties. It supposes that DO has nominal values of its parameters, that the restrictions of power of DO actuators are not considered, and that the arbitrary (unknown and unmeasured) external influences are presented. This control must provide the main trend of required movement of DO but signal $u(t)$, which forms by means of the first-control strategy [1], and the control must compensate for the inevitable errors due to accounting for its dynamic properties and unknown external influences. The MCU may also include the typical or adaptive controllers by considering the presence of unknown or variable parameters of DO.

A disadvantage of this strategy is the necessity to use complicated CS [5–9] that nevertheless cannot provide for the actuator restrictions in each control

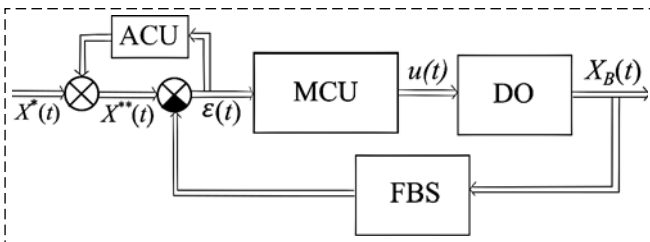


Fig. 3. The generalized schema of implementing this strategy

channel of DO. This can lead to control loss of this DO.

Therefore, the analysis above shows that there is no control strategy that easily creates implemented CS for high-accuracy control of complicated DO with variable and unknown parameters during its movement along arbitrary smooth spatial trajectories.

2. Task setting

In this paper, the following task is set and solved. It is necessary to develop the new control strategy for complicated nonlinear DO with variable and unknown parameters to provide high accuracy control by considering the restricted DO actuators by means of easily implemented CS. To develop the new synthesis methods, these CS that provide the deviation of DO from desired trajectories cannot exceed the allowable values.

This new strategy supposes not only the direct control of DO when it moves along desirable trajectories (it usually needs to use the differential equations instrument) but also the control of program signals coupled with simple tracking control systems installed in each control channel and providing only stability of the corresponding control loop. These CS must control the program signals that form such coordinates of the moving target points which ensure DO movement near all parts of the desirable trajectories with high accuracy even if large errors of tracking are present.

3. The description of movement of dynamic control object along spatial trajectory

The DO already has the typical (simple) CS as follows:

$$u(t) = F_u(\varepsilon(t), X^*(t)), \quad (1)$$

which provide its stable movement along spatial trajectory. The vector $X^*(t)$ is formed in the global coordinate frame (GCF) by means of the following expression [10, 11]:

$$\dot{X}^*(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ g'_y(x^*) \\ g'_z(x^*) \end{bmatrix} \Phi(x^*) v^* = f_v(x^*) v^*, \quad (2)$$

where $\Phi(x^*) = (1 + (g'_y(x^*))^2 + (g'_z(x^*))^2)^{-1/2}$, $g'_y(x^*) = \frac{\partial g_y(x^*)}{\partial x^*}$, $g'_z(x^*) = \frac{\partial g_z(x^*)}{\partial x^*}$; $g_y(x^*)$, $g_z(x^*)$

are the functions describing the desired trajectory of DO movement in vertical and horizontal plans, respectively; v^* is the program velocity of DO movement along this trajectory.

The values of elements of vector $\varepsilon(t)$ depend on the curvature of current path of trajectory, velocity of DO movement along this trajectory, used CS, and vector P of the variable parameters of DO

$$\varepsilon(t) = F_\varepsilon(X^*(t), F_u(\cdot), P). \quad (3)$$

If DO moves along the curvilinear trajectory and $\varepsilon(t) \neq 0$, then vector $\varepsilon_n(t) = F_n(X(t), g_y(\cdot), g_z(\cdot), \varepsilon(t)) \neq 0 \in R^n$ always arises (see Fig. 4). This vector defines the deviation of DO from the trajectory and always satisfies the following inequality:

$$0 \leq \|\varepsilon_n\| \leq \|\varepsilon\|. \quad (4)$$

If value of vector P is variable and control law $F_u(\cdot)$ is unchanged, then value $\|\varepsilon_n\|$ can be decreased by means of changing of coordinates of vector $X^*(t)$. Expression (2) shows that it can be possible by means of decreasing the value v^* on the part of the trajectory having a large curvature. However, it is undesirable if actuators of DO have a reserve of power to provide the high-speed movement.

In accordance with task setting described above and using typical tracking CS (TCS) described by (1) and vector $X^*(t)$ described by (2), we develop the new control strategy for DO on the basis of forming a program signal of its movement that allows movement along all parts of trajectory based on the

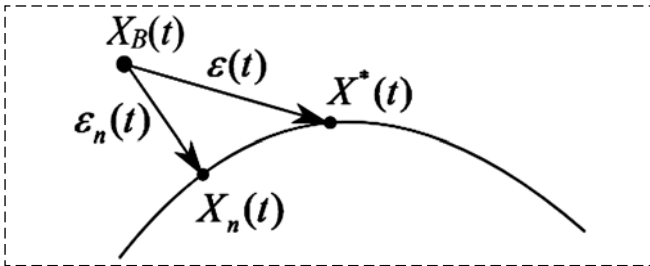


Fig. 4. The vectors of dynamic errors and deviation

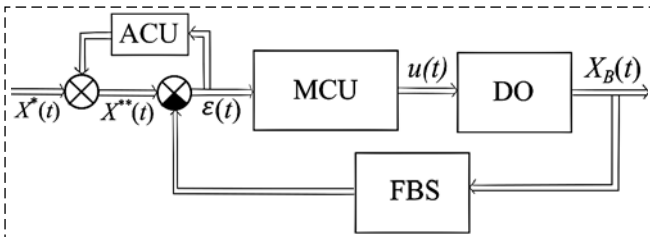


Fig. 5. The generalized diagram of CS DO that implements the new control strategy

saturation of DO actuators and satisfying the following condition:

$$\|\varepsilon_n(t)\| \leq \varepsilon_{\max}, \quad (5)$$

where $\varepsilon_{\max}$ is the allowable deviation of DO from the desired trajectory.

The generalized structure diagram that implements this new control strategy is presented in Fig. 5, where $X^{**}(t) \in R^3$ is the vector of the current coordinates of desired position of target point which enter the inputs of each control channel (typical tracking systems). This diagram differs significantly from other diagrams presented in Fig. 1–3.

4. The forming of program signals of dynamical object movement

The truth equation

$$\begin{aligned} & \|\varepsilon_n(t)\| = \\ & = \|F_n(X_B(t), g_y(\cdot), g_z(\cdot), F_\varepsilon(X^{**}(t), F_u(\cdot), P))\| = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ensures that the DO movement is along the arbitrary spatial trajectory with any achievable velocity and zero deviation from this trajectory. However, solving (6) at a relatively desired position of target point $X^{**}(t) \in R^3$ is possible only for simplest cases, and numerical solutions in real time is very complicated. For this reason, instead of the exact solution presented in (6), numerical solutions should find and use the approximate solution that satisfies (5).

The value $X^{**}(t)$ that provides approximately the truth of (6) we find in the following form:

$$X^{**}(t) = X^*(t) + \Delta X^*(t), \quad (7)$$

where $\Delta X^*(t) \in R^3$ is the vector of additional program signal that shifts the target point $X^*(t)$ from the desired trajectory of DO movement.

The signal $X^*(t)$ should be entered on inputs of CS DO and the real position $X(t)$ of DO (dashed line in Fig. 6) on distance $\|\varepsilon_n(t)\|$ from trajectory $X^*(t)$ (solid line in Fig. 6). If signal $X^{**}(t)$ (dotted line in Fig. 6) that is copied from $X(t)$ and is located symmetric about trajectory $X^*(t)$ is used instead of signal $X^*(t)$, then real movement of DO $X_B(t)$ (dash-dotted line in Fig. 6) has a decreased distance from trajectory $X^*(t)$. Herewith the following condition is valid:

$$\varepsilon(t) = X^*(t) - X(t) \approx X^{**}(t) - X_B(t) = \varepsilon^*(t).$$

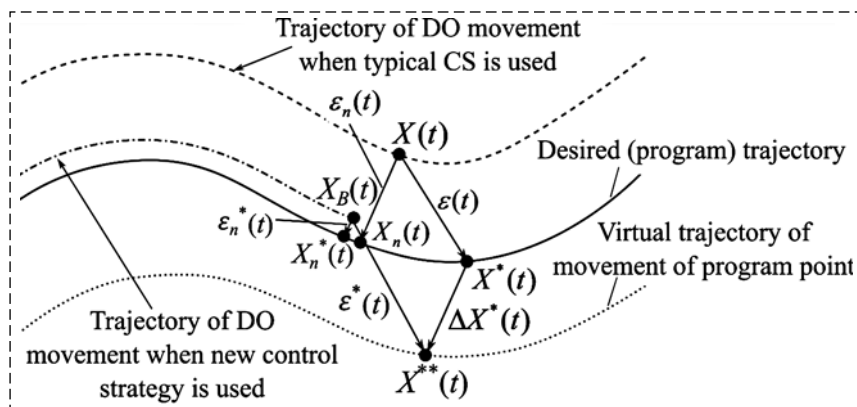


Fig. 6. The schema of DO movement near the program trajectory

It is impossible to define the value $\|\varepsilon_n(t)\|$ a priori, as it depends on the curvature of $X^*(t)$, velocity, DO dynamic parameters and parameters of interaction with the environment. Thus, the $X^{**}(t)$ can be formed during the DO movement only.

The vector $\Delta X^*(t)$ can be defined as follows:

$$\Delta X^*(t) = X_n(t) - X(t) = \varepsilon_n(t). \quad (8)$$

Then considering the expressions of (7) and (8), we have

$$X^{**}(t) = X^*(t) + \varepsilon_n(t) = X^*(t) + \Delta X^*(t). \quad (9)$$

The value $\varepsilon^*(t)$ is large when the vector $\Delta X^*(t)$ is entered, but value $\|\varepsilon_n^*(t)\|$ (see Fig. 2) is decreased significantly. However, forming vector $X^{**}(t)$ is a complicated task as DO is on a point $X_B(t)$ near the trajectory $X^*(t)$ and the $X(t)$ cannot be defined. Thus, the vector $\Delta X^*(t)$ that holds DO near to $X^*(t)$ while signaling $X^{**}(t)$ needs to be estimated. We then solve this task by means of CS, whose block diagram is shown in Fig. 7, where BFD is the block of forming the deviation DO from trajectory $X^*(t)$.

The CS shown in this figure has two inputs. The signal $X^*(t)$ enters in the first input, and sig-

nal $\Delta X^{**}(t) \approx \Delta X^*(t)$ enters in second input. The signal $\Delta X^{**}(t)$ is calculated during DO movement near the trajectory $X^*(t)$ by means of the expression

$$\begin{aligned} \Delta X^{**}(t) &= k_{ne}[X_n^*(t) - X_B(t)] = \\ &= k_{ne}\varepsilon_n^*, \quad (\varepsilon_n^* \ll \varepsilon_n), \end{aligned} \quad (10)$$

where $k_{ne} = \text{const} > 1$ is the coefficient that is selected so that the condition (5) will be true for all parts of trajectory and the stability of TCS is maintained.

The proposed control strategy of DO movement along trajectory $X^*(t)$

is correct for any stable TCS (1). The main task for forming signal (10) is calculating vector ε_n^* . This task is solved in section 5.

5. Calculation of vector ε_n^*

To calculate the coordinates of point $X_n^*(t)$ and vector ε_n^* , we can use the method proposed in the work [11]. This method requires the numerical solution of system of nonlinear equation by means of a powerful onboard computer. However, we can estimate the $\hat{\varepsilon}_n(t)$ of vector ε_n^* , because the value $\|\varepsilon_n^*(t)\|$ is usually much less than the radius of curvature for all parts of trajectory $X^*(t)$. In this case, the vector $\hat{\varepsilon}_n(t)$ is found as perpendicular to tangent line N of trajectory $X^*(t)$ (see Fig. 8). The coordinates of point $\hat{X}_n(t)$ (see Fig. 8) are defined in semi-body fixed coordinate frames with axis $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ that are parallel to the axis of GCF, while its center is the center of mass of DO (point $X_B(t)$).

In this coordinate frame, the point $X^*(t)$ is defined by coordinates of vector $\varepsilon(t) = (\varepsilon_{\hat{x}}, \varepsilon_{\hat{y}}, \varepsilon_{\hat{z}})^T$, and point $\hat{X}_n(t)$ by coordinates of vector $\hat{\varepsilon}_n(t)$. The equation of the tangent line N passing through point $X^*(t)$ and coinciding with vector v^* has the following form [12]:

$$\frac{x - \varepsilon_{\hat{x}}}{f_1} = \frac{y - \varepsilon_{\hat{y}}}{f_2} = \frac{z - \varepsilon_{\hat{z}}}{f_3}, \quad (11)$$

where f_1, f_2, f_3 are the elements of vector $f_v(x^*)$ (2). The equation of plane G passing through point $X_B(t)$ and being perpendicular to line N has the following form [12]

$$f_1 \hat{x} + f_2 \hat{y} + f_3 \hat{z} = 0. \quad (12)$$

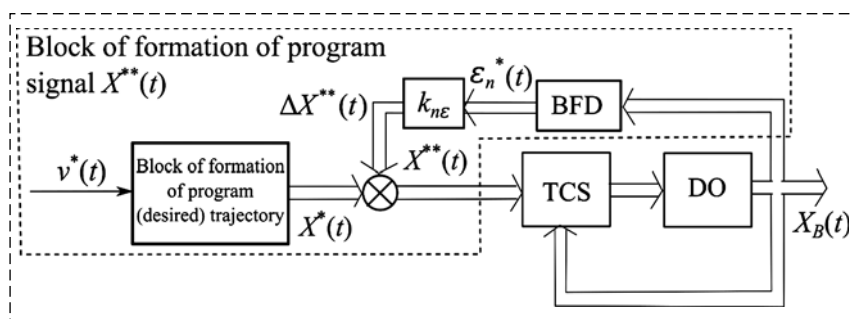


Fig. 7. The block diagram of the system that implements the new control strategy

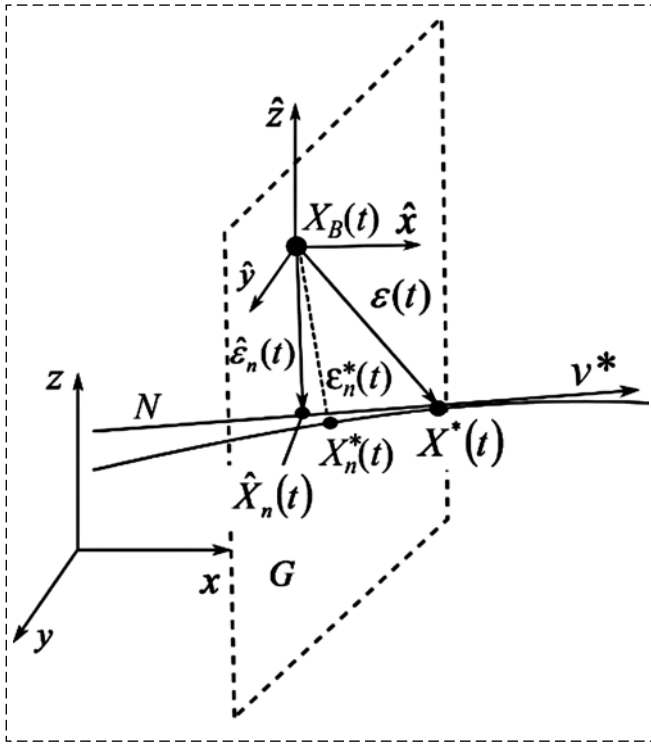


Fig. 8. The schema for calculating vector $\hat{\varepsilon}_n$

After solving system (11) and (12) we have the following expression:

$$\hat{\varepsilon}_n(t) = \begin{bmatrix} \frac{f_2^2 + f_3^2}{f_1} & -f_1 f_2 & -f_1 f_3 \\ \frac{f_2^3 + f_2 f_3^2 - f_1}{f_1} & 1 - f_2^2 & -f_2 f_3 \\ \frac{f_3^3 + f_2^2 f_3 - f_1}{f_1} & -f_2 f_3 & 1 - f_3^2 \end{bmatrix} \varepsilon(t),$$

which can define the vector $\Delta X^{**}(t)$ with enough accuracy in the form:

$$\Delta X^{**}(t) \approx k_{\varepsilon n} \hat{\varepsilon}_n(t). \quad (13)$$

6. The results of study of proposed control system

The simulation was performed to study the workability and efficacy of the proposed control strategy. In this simulation, the underwater vehicle (UV) was used as DO. This UV is described by means of the mathematical model from [7]. The actuators of UV have equal parameters and its dynamic, which is described as the aperiodical dynamic link of the first order. The other parameters of this model were the UV mass $m_a = 100$ kg; the main inertia moments, $J_{xx} = 2$ kg·m², $J_{yy} = 10$ kg·m², and

$J_{zz} = 10$ kg·m²; the hydrodynamic coefficients, $d_{1x} = 25$ kg·s⁻¹, $d_{2x} = 50$ kg·m⁻¹, $d_{1y} = 50$ kg·s⁻¹, $d_{2y} = 100$ kg·m⁻¹, $d_{1z} = 50$ kg·s⁻¹, $d_{2z} = 100$ kg·m⁻¹, $d'_{1x} = 4$ Nms, $d'_{1y} = 7,5$ Nms, $d'_{1z} = 7,5$ Nms, $d'_{2x} = 8$ Nms², $d'_{2y} = 15$ Nms², and $d'_{2z} = 15$ Nms²; the added mass and inertia moments of fluid, $\lambda_1 = 20$ kg, $\lambda_2 = 40$ kg, $\lambda_3 = 40$ kg, $\lambda_4 = 0,5$ kg·m², $\lambda_5 = 1$ kg·m², and $\lambda_6 = 1$ kg·m²; the metacentric height, $Y_c = 0,02$ m; and the time constant of actuators, $T_a = 0,1$ s.

It is supposed that UV (see Fig. 7) has CS that includes the position and orientation of the simplest controllers in each channel. The transfer function of these controllers has the following perspective, $W(s) = K(T_1 s + 1)/(T_2 s + 1)$, and its parameters have the following values, $K = 20$, $T_1 = 2,51$ s, and $T_2 = 0,01$ s. The parameters of the system of controlling the program signal (see Fig. 7) have the following values, $k_{ne} = 8$.

The planar horizontal movement of UV along trajectory with the described expression $y^*(t) = 10 \sin(\pi x^*(t)/20)$ was studied. This movement begins at the zero-initial conditions $x_0^* = 0$ and $y_0^* = 0$, the longitudinal axis of UV is directed always to moving point $X^*(t)$, and the desirable velocity is constant. The desirable yaw angle is calculated by the expression $\varphi^*(t) = \arctg((y^{**}(t) - y(t))/(x^{**}(t) - x(t)))$ [7].

The processes of changing the values $v(t)$, $\|\varepsilon^*(t)\|$, $\|\varepsilon_n^*(t)\|$ and $y(t)$ during UV movement with using program signal (9), (10) and $v^* = \text{const} = 1$ m/s are shown in Fig. 9. This figure shows that the maximal value $\|\varepsilon_n^*(t)\|$ is 0,13 m.

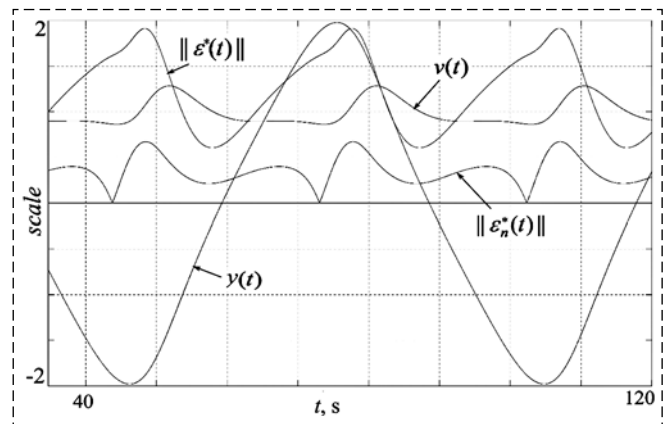


Fig. 9. Process of UV movement when the proposed control strategy is used

$$v(t) = \text{scale} (m/s); \quad y(t) = \text{scale} \cdot 5 (m); \quad \|\varepsilon_n^*(t)\| = \text{scale} \cdot 0,2 (m); \quad \|\varepsilon^*(t)\| = 2 \cdot \text{scale} (m)$$

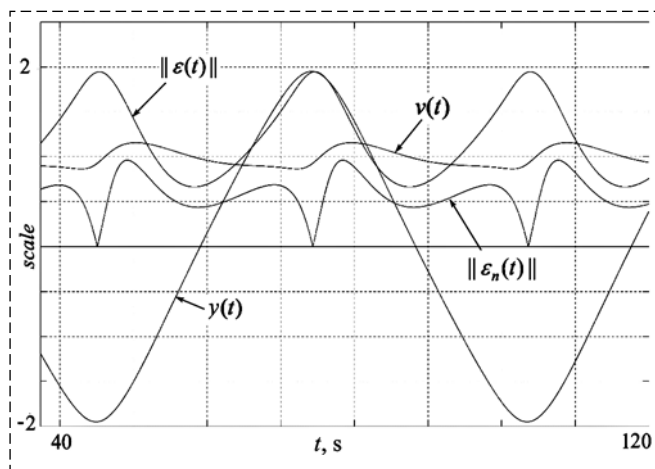


Fig. 10. Process of UV movement when the traditional control strategy is used

$$v(t) = \text{scale} (m/s); z(t) = \text{scale} \cdot 5 (m); \|\varepsilon_n(t)\| = \text{scale}(m); \|\varepsilon(t)\| = 2 \cdot \text{scale}(m)$$

For comparison, the processes of changing these values at signal $X^*(t)$ by means of (2) are shown in Fig. 10. This figure shows that the maximal value of deviation UV from the desired trajectory is 0,95 m. Thus, by using signal $X^{**}(t)$ (9), (10) more, the accuracy of UV movement along desired trajectory was increased 7-fold without changing its CS. Additionally, the values of the dynamical errors $\|\varepsilon(t)\|$ and $\|\varepsilon^*(t)\|$ (see Fig. 6) for program signals $X^*(t)$ and $X^{**}(t)$ are almost equal.

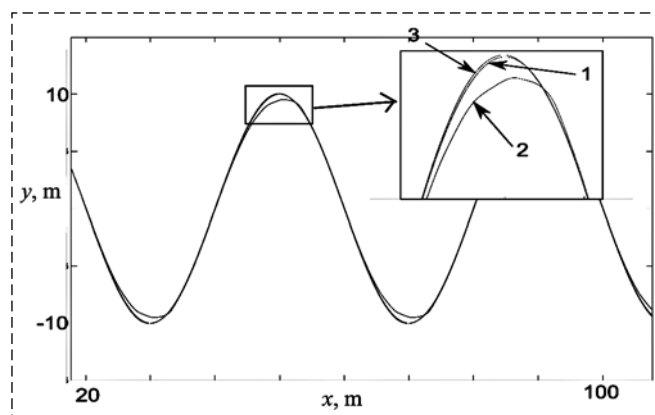


Fig. 11. The features of forming the virtual trajectory

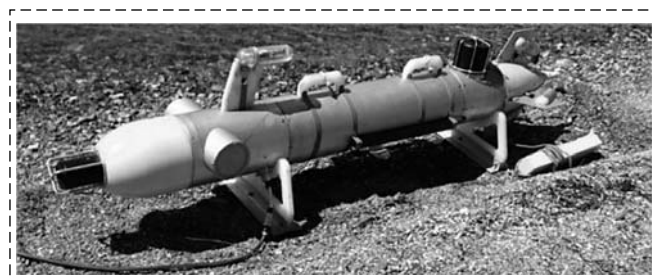


Fig. 12. The external view of AUV MARK

The desired trajectory of UV movement (curve 1), the virtual trajectory forming by means of signal $X^{**}(t)$ (curve 2), and the real trajectory of UV movement (curve 3) are shown in Fig. 11. This figure shows that the UV position and target point $X^{**}(t)$ are always on opposite sides regarding the desired trajectory.

In addition, the marine experiments that use AUV MARK (see Fig. 12) and were designed in Far Eastern Federal University and Institute of Marine Technology Problems were performed [13, 14].

The AUV movement along trajectory is defined by means of Bezier splines passing through points $(0,0,0) \rightarrow (0,20,0) \rightarrow (20,20,0) \rightarrow (20,0,0) \rightarrow (0,0,0)$ is studied during these experiments. MARK has three control channels: channel controlling forward movement and channels controlling angles of yaw and pitch. The PD-controllers are used in the first and second channels, and the PID-controller is used in third channel. The $k_{ne} = 2$ (see Fig. 7) and the AUV desired velocity is 1 m/s.

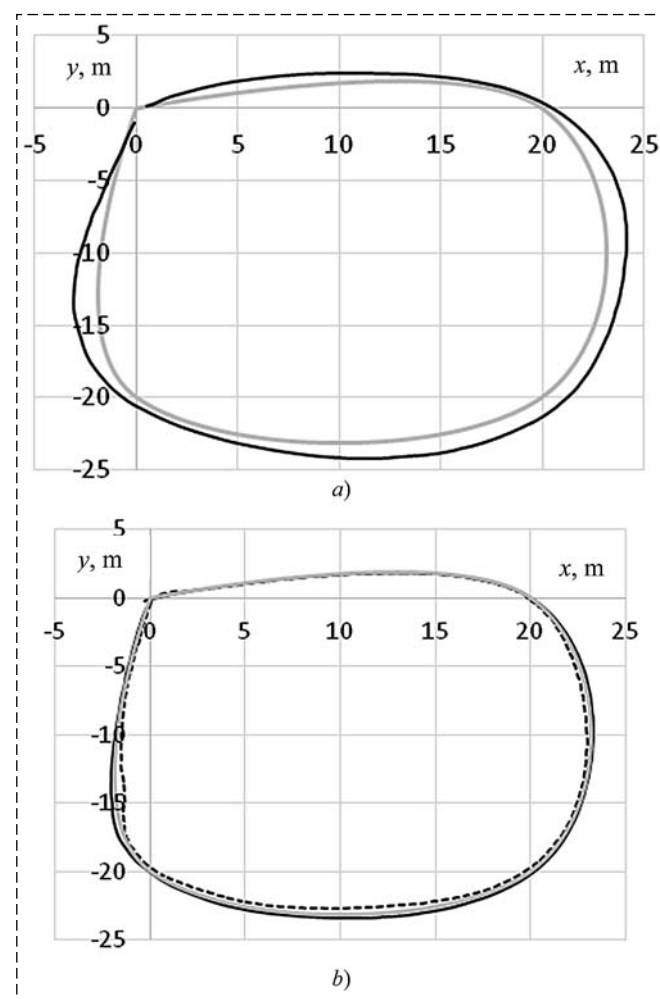


Fig. 13. Trajectories of AUV movement without using (a) the additional loop of forming signal $\Delta X^{**}(t)$ and with the additional loop (b)

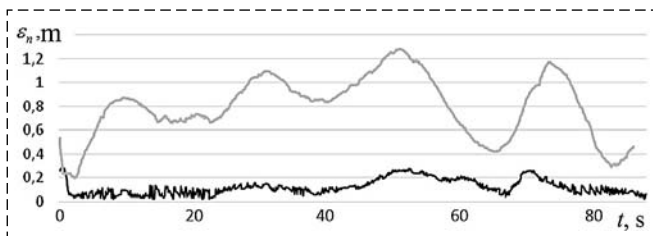


Fig. 14. Change in AUV deviation from the defined trajectory without using an additional loop of forming the signal $\Delta X^{**}(t)$ and the additional loop

The AUV movement (black curve) along the defined trajectory (gray line) without additional loop of forming of signal $\Delta X^{**}(t)$ are shown in Fig. 13a and with using of this loop in Fig. 13b. Here, the dashed curve is the virtual trajectory formed by signal $\Delta X^{**}(t)$.

The deviations of AUV from the defined trajectory using (gray curve) the additional loop of formation of signal $\Delta X^{**}(t)$ and without it (black curve) are shown in Fig. 14. This figure shows that using this additional loop decreases the deviation of AUV from the defined trajectory more than four times (from 1,3 m to 0,3 m).

Thus, the results of mathematical simulation confirm the workability and high efficacy of the new control strategy for DO, which enables designing the systems to automatically form program signals $X^{**}(t)$ for the movement of DO along spatial trajectories.

Conclusions

The new control strategy of high accuracy control of spatial movement of complicated multichannel DO in tracking mode is proposed in this paper. This strategy bases on control of not only DO but also of its program signals and shows that it is easier, useful, and effective. Herewith as against traditional strategies, using virtual trajectories that provide high accuracy movement of DO along desired trajectory is allowed by means of simple controllers even if dynamic errors reach large values. In other words, high accuracy movement of DO along smooth desired trajectories is provided by means of forming new program signals but not by using the complicated high quality CS, which minimized the dynamical errors of tracking.

The results of the mathematical simulation show that using the new control strategy increases the dynamic accuracy of movement of complicated DO along desired trajectories without improving the quality of its tracking CS.

References

1. **Wiener N.** Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine, The Technology Press and John Wiley&Sons, Inc., New York—Hermann et Cie, Paris, 1948.
2. **Petrov B. N.** The Principle of Invariance and Conditions for its Use in Designing Linear and Nonlinear Systems, *Proc. of 1st IFAC Congress*, London, Butterworth, 1960, pp. 259—275.
3. **Vukobratovic K. M., Stokic M. D.** Scientific Fundamentals of Robotics, 2, Control of Manipulation Robots: Theory and Application, Springer-Verlag, Berlin, 1982.
4. **Vukobratovic M., Stokic D., Kircanski N.** Non-adaptive and Adaptive Control of Manipulation Robots, Springer-Verlag, Berlin, 1985.
5. **Lebedev A. V., Filaretov V. F.** Synthesis of a self-adjusting system with a reference model for controlling the velocity of spatial motion of an underwater robot, *Int. J. Comput. Syst. Sci.*, 2002, vol. 41, no. 2, pp. 331—337.
6. **Lebedev A. V., Filaretov V. F.** Multi-Channel Variable Structure System for the Control of Autonomous Underwater Vehicle, *Proc. of IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation*, Harbin, China, 2007, pp. 221—226.
7. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle, *Int. J. Ind. Eng. Manage*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 133—141.
8. **Filaretov V. F., Zuev A. V.** Features of designing combined force/position manipulator control systems, *Int. J. Comput. Syst. Sci.*, 2007, vol. 48, no. 1, pp. 146—154.
9. **Lebedev A. V., Filaretov V. F.** Self-adjusting system with a reference model for control of underwater vehicle motion, *Opto-electronics, Instrumentation Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 462—470.
10. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** A method for forming program control for velocity regime of motion of underwater vehicles along arbitrary spatial trajectories with given dynamic accuracy, *Int. J. Comput. Syst. Sci.*, 2011, vol. 50, no. 4, pp. 673—682.
11. **Lebedev A. V.** The formation of dynamic objects trajectories in conditions of control signals saturation, *Proc. of 18th World Multi-Conf. Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2014, vol. 1, pp. 154—159.
12. **Korn G. A., Korn T. M.** Mathematical handbook, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1968.
13. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Mursalimov E. Sh., Scherbatyuk A. F., Tuphanov I. E.** *Noviy method konturnogo upravleniya ANPA* (The method of tracking Control of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Motion), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 8, pp. 46—56 (in Russian).
14. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Mursalimov E. Sh., Scherbatyuk A. F., Tuphanov I. E.** Some Marine Trial Results of a New Method for AUV Trajectory Motion Control, *Proc. Of OCEANS14 MTS/IEEE*, Taipei, Taiwan, 2014, pp. 1—6.

А. В. Гулай, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by, В. М. Зайцев, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Цифровой контроль тенденций изменения сенсорных параметров в интеллектуальных системах

Текущие состояния мехатронных систем и состояния объектов управления в каждом цикле функционирования обычно оцениваются с помощью набора значений контролируемых параметров, которые формируются измерительными трактами системы на основании сигналов сенсоров. В настоящее время в мехатронике широко применяются методы анализа трендов изменения системных параметров и контроля их нахождения в границах предупредительных и аварийных интервалов. Однако это обеспечивает выявление фактов развития уже сформировавшихся негативных тенденций, когда требуется незамедлительное принятие экстренных управленческих решений и технических мер по предотвращению аварийных ситуаций. Более эффективное управление может быть реализовано при ранней оценке динамики развития событий, что крайне важно для мехатронных систем, в которых имеет место сравнительно быстрое протекание системных процессов. В связи с этим рассмотрено циклическое использование трехшагового процесса непрерывного динамического отслеживания временных рядов контролируемых параметров и применение аппарата нечеткой логики с кодовой фазификацией для принятия оперативных решений о выявлении негативной направленности трендов на каждом из пяти последовательных интервалов наблюдения. Выработка в мехатронной системе решений об устойчивости нарастания или убывания отдельных параметрических трендов или о наличии трендовых флэтов может осуществляться с помощью конечного набора продукционных правил, которые образуют последовательную структуру логических выводов. В логическом отношении наиболее просто процедуры отслеживания миграций параметров и продукционные правила выработки решений реализуются на процессорах, которые поддерживают операции с плавающей точкой и логические поразрядные операции.

Ключевые слова: интеллектуальная система, сенсорный контроль, цифровое управление, миграция параметров, тренд краткосрочный

Введение

Состояния интеллектуальных, в том числе мехатронных, систем и объектов управления в каждом цикле функционирования обычно оцениваются с помощью текущих значений контролируемых параметров, которые формируются измерительными трактами системы на основании сигналов сенсоров. Задание состава контролируемых параметров и пределы требуемых допусков определяются проектировщиками и экспертами на стадии разработки интеллектуальной системы. Используемые в настоящее время методы построения и анализа трендов миграции сенсорных параметров и введения границ предупредительных и аварийных интервалов их изменения обеспечивают выявление фактов развития уже сформировавшихся негативных тенденций, когда требуется незамедлительное принятие экстренных управленческих решений и технических мер по предотвращению аварийных ситуаций.

Более эффективное управление работой системы может быть реализовано при оценке динамики развития событий на ранней стадии формирования тренда миграции параметров. Проблема создания интеллектуальных методов оперативного контроля трендов миграции

системных параметров обусловлена необходимостью выявления тенденций опасного приближения их значений к границам запрещенных областей и выхода в эти области, характеризующие аварийные и катастрофические ситуации. Для реального снижения уровня уязвимости производственно-технологических процессов и опасности возникновения аварий объективно требуется решение задачи непрерывного отслеживания траекторий миграции текущих значений критических параметров оборудования и внешней среды. В процессе контроля трендов миграции системных параметров необходимо принятие адекватных управленческих мер при выходе указанных значений за допустимые пределы.

Некоторые аспекты обсуждаемой проблемы рассматриваются в теории наблюдения, фильтрации и апостериорной обработки параметров случайных процессов. Основные положения этой теории нашли практическое применение, прежде всего, в системах автоматического сопровождения движущихся объектов [1–3]. В традиционной постановке данной задачи требуется в реальном масштабе времени реализовать многошаговый циклический процесс построения траектории по ограниченному числу дискретных измерений текущих коор-

динат. Решение этой задачи осложняется тем, что траектории движения объектов не предполагают их априорную известность, а наблюдения проводятся в условиях влияния случайных факторов на оценку координат пространственного положения. Разнообразные негативные явления могут приводить к существенным потерям координатной информации в отдельных циклах измерений [4, 5].

Исследования по теории катастроф привели к выделению и спецификации нескольких математических моделей развития катастрофической ситуации, которые различаются типами бифуркационных процессов [6—9]. Общетеоретическая классификационная значимость и математическая ценность полученных результатов неоспорима, однако эти конкретные закономерности трудно применимы в инженерном проектировании. Причины этого кроются в том, что выводы и заключения относительно динамики реальных угроз не могут быть отнесены ни к категории четких, ни к разряду вероятностных. При этом можно говорить только о некоторой степени уверенности в правомочности выводов и оценок в зависимости от доверия к знаниям экспертов и от фактических ситуаций, складывающихся на рассматриваемых интервалах времени.

Следует отметить, что при использовании быстродействующих вычислительных средств с большими объемами оперативной памяти имеются объективные технические предпосылки для оперативного отслеживания траекторий миграции значений критических параметров и контроля за их приближением к границам запрещенных областей. Нарращивание арсенала разнообразного электронного оборудования цифровой автоматики и коммуникаций, аппаратно-программных средств обработки информации, обладающих свойствами искусственного интеллекта, позволяют одновременно выявлять зарождение аварийно опасных тенденций в возможной миграции значений критических параметров. Интеллектуальные компоненты при этом должны обладать способностью к рациональному функционированию в условиях действия НЕ-факторов (неполноты состава и неточности числовых данных, неустойчивости признаков событий и их возможных последствий, недостаточной строгости правил поведения и управления).

Интеллектуальная технология контроля тенденций изменения сенсорных параметров

Для семантического описания техногенных аварий на макроструктурном уровне эффективно применение дерева сценариев, в корневых вершинах которого размещаются возможные причины аварий. Ветвям дерева сценариев соответствуют ожидаемые варианты развития событий, отражающие в хронологическом порядке вовлекаемые в аварию составные части и процессы рассматриваемого объекта и его окружения, складывающиеся ситуации, защитные мероприятия персонала, результаты действий и наступившие последствия. Дерево сценариев, по сути, отображает концептуальную схему предметной и проблемной областей аварии, которые основываются на суждениях экспертов, их опыте и интуиции.

Концептуальная схема и дерево сценариев на этапе предварительного анализа задачи позволяют выделить макросостояния аварийно опасного объекта в виде некоторого множества $\{X_j(t)\}$, где $j = 1, 2, \dots, n$; n — число макросостояний объекта; t — время. Отдельные макросостояния естественно оценивать совокупностями текущих значений контролируемых параметров (характеристик) α внутренних микросостояний, которые трактуются как координаты вектора $X_v(t)$:

$$X_v(t) = [\alpha_{v1}(t), \alpha_{v2}(t), \dots, \alpha_{vr}(t), \dots, \alpha_{vR}(t), \dots, \alpha_{va}(t), \alpha_{vb}(t), \dots],$$

где v — указатели параметров внутренних микросостояний объекта; R — число критических параметров.

Значения каждой координаты характеризуют возможные микросостояния объекта. Они соответствуют тем или иным аспектам протекания внешних и внутренних процессов и формируются измерительными трактами на основании сигналов сенсоров. Точность представления контролируемых параметров зависит от чувствительности сенсоров, характеристик трактов измерения, достоверности передачи информации по системным каналам, технической надежности аппаратуры, алгоритмов оцифровки и обработки данных. Для каждого макросостояния $X_j(t)$ некоторое число R координат вектора соответствует критическим параметрам (характеристикам). Состав критических параметров определяется шкали-

рованием мнений экспертов и последующим обобщением экспертных оценок.

На стадии системного анализа целесообразно полагать координаты вектора взаимно независимыми, что соответствует наихудшим условиям оценки энтропии возможных состояний объекта. Для оценки возможных микросостояний по каждому из параметров или характеристике объекта необходимо задать пределы (границы) допусков безаварийного функционирования:

$$\alpha_{vz}(t) \in (\alpha_{vz\ H}, \alpha_{vz\ B}),$$

где $\alpha_{vz\ H}$, $\alpha_{vz\ B}$ — требуемый нижний и верхний пределы допуска параметра $\alpha_{vz}(t)$ для $z = 1, 2, \dots, R$ [10]. Определение указанных пределов достигается расчетным или экспертным путем.

В состав вектора $X_v(t)$ должны включаться существенные параметры (в терминологии У. Р. Эшби — только "главные параметры"). Состав контролируемых параметров и пределы требуемых допусков могут быть заданы исключительно экспертами — высококвалифицированными системными аналитиками в области создания и использования интеллектуальных мехатронных систем конкретного функционального назначения. Набор ожидаемых вероятностей нахождения каждого из параметров в пределах требуемых допусков устанавливается путем моделирования процессов формирования и получения блоком цифрового управления вектора $X_v(t)$.

Исходной информацией для выявления тенденций в изменении параметров являются временные ряды в виде последовательности наблюдений в дискретные моменты времени одной или нескольких координат случайного вектора $X_v(t)$ [11, 12]:

$$\{\alpha_{vz}(t) \in (\alpha_{vz\ H}, \alpha_{vz\ B})\}; \\ t = t_0 + k\Delta t; k = 0, 1, 2, \dots; \Delta t \leq 1/2f_{\max}.$$

Здесь $f_{\max}$ — частота дискретизации параметров, значение которой в соответствии с теоремой Котельникова — Найквиста принято в системе в качестве граничного для спектральных разложений координат вектора $X_v(t)$.

Наблюдения координат в дискретные моменты времени t образуют k -е уровни их трендов. Каждый уровень формируется под воздействием большого числа факторов, которые традиционно разделяются на следующие группы:

- факторы, определяющие преобладающую тенденцию (собственно тренд);
- факторы, приводящие к циклическим колебаниям ряда;
- случайные факторы.

В большинстве случаев для каждой компоненты $\alpha_{vz}(t)$ k -й уровень ее временного ряда можно представить как некоторую аддитивную комбинацию трендового, циклического и случайного компонентов.

Классической задачей анализа трендов является прогнозирование на его основе развития контролируемого процесса. С этой целью, как правило, применяется хорошо апробированная, но достаточно громоздкая схема исследований, предполагающая графическое представление и описание поведения уровней рассматриваемых временных рядов, выделение и использование закономерных (неслучайных) составляющих, сглаживание и фильтрацию параметров, исследование случайных составляющих и построение схемы прогнозов [11, 12]. В мехатронных системах, для которых характерны быстропротекающие процессы, практическое значение при выработке управленческих решений имеют краткосрочные тренды. Для их оперативного выявления целесообразно применение существенно иной схемы анализа изменений координат векторов $X_v(t)$.

Предлагается использовать n -шаговый процесс непрерывного динамического отслеживания отдельных временных рядов $\alpha_{vz}(t)$ контролируемых координат векторов $X_v(t)$ и применение аппарата нечеткой логики для принятия оперативных решений о выявлении трендов на каждом из m последовательных интервалов наблюдения, "скользящих" по оси времени. Анализ научно-технических источников и практический опыт построения сложных системотехнических комплексов показывает, что для рассматриваемого случая интеллектуальных мехатронных систем наиболее приемлемы значения n и m не выше $n = 3$, $m = 5$, поскольку их увеличение не приводит к существенному повышению точности прогноза. При этом

$$(t_i; t_{i+1} = t_i + \Delta t); (t_{i+1}; t_{i+2} = t_i + 2\Delta t); \dots; \\ (t_{i+4}; t_{i+5} = t_i + 5\Delta t)$$

для $i = 0; 1; 2; 3; \dots$

За основу выработки решений принимают результаты линейного аналитического сгла-

живания фактических измерений параметра $\alpha_{vz}(t)$ в четырех смежных отсчетах:

$$\begin{aligned} & \alpha_{vz}(t_i); \alpha_{vz}(t_i + 1); \alpha_{vz}(t_i + 2); \alpha_{vz}(t_i + 3); \\ & \alpha_{vz}(t_i + 1); \alpha_{vz}(t_i + 2); \alpha_{vz}(t_i + 3); \alpha_{vz}(t_i + 4); \\ & \alpha_{vz}(t_i + 2); \alpha_{vz}(t_i + 3); \alpha_{vz}(t_i + 4); \alpha_{vz}(t_i + 5). \end{aligned}$$

Рассмотрим традиционный процесс аналитического сглаживания фактических измерений некоторой координаты α_{vz} вектора X_v при условии, что ошибки измерений распределены по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением σ_{vz} . Для сглаживания выбраны четыре смежных отсчета, потому что это минимальное число отсчетов, которое позволяет достаточно обоснованно выявить локальную тенденцию целенаправленной миграции значений параметра $\alpha_{vz}(t)$. Воспользуемся методом линейного аналитического сглаживания; в этом случае на интервале времени $(t_i, t_i + 3 = t_i + 3\Delta t)$ сглаживающая зависимость будет иметь следующий вид [13]:

$$A_{vz}(t_i, t) = [K_{\alpha}/D_t]t + M_{\alpha} - [K_{\alpha}/D_t]M_t.$$

Оптимальные коэффициенты данного выражения выводятся на основе метода наименьших квадратов. При этом расчеты среднего значения M_t и дисперсии D_t времени t , дисперсии координаты M_{α} и коэффициента корреляции K_{α} для четырех смежных отсчетов могут выполняться по соотношениям, достаточно простым в части состава операций и коротким по времени реализации:

$$\begin{aligned} M_t &= t_i + 1,5\Delta t; \\ D_t &= 1,25\Delta t^2; \\ M_{\alpha} &= [\alpha_{vz}(t_i) + \alpha_{vz}(t_i + \Delta t) + \\ &+ \alpha_{vz}(t_i + 2\Delta t) + \alpha_{vz}(t_i + 3\Delta t)]/4; \\ K_{\alpha} &= \Delta t[-0,375\alpha_{vz}(t_i) - 0,125\alpha_{vz}(t_i + \Delta t) + \\ &+ 0,125\alpha_{vz}(t_i + 2\Delta t) + 0,375\alpha_{vz}(t_i + 3\Delta t)]. \end{aligned}$$

Если локальная тенденция действительно имеет место и отражается зависимостью $A_{vz}(t_i, t)$, то при нормальном распределении ошибок измерений каждое из значений $\alpha_{vz}(t_i)$; $\alpha_{vz}(t_i + 1)$; $\alpha_{vz}(t_i + 2)$; $\alpha_{vz}(t_i + 3)$ с вероятностью не ниже $p = 0,997$ должно находиться внутри зоны тренда

$$\alpha_{vz}(t) \in A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i, t) \pm 3\sigma_{vz}.$$

Этот признак целесообразно использовать в качестве критерия выявления локальной тен-

денции нарастания ($K_{\alpha} > 0$), убывания ($K_{\alpha} < 0$) или слабой изменчивости ($K_{\alpha} \approx 0$) по времени координаты $\alpha_{vz}(t)$ при доверительной вероятности события $P_{\text{дов}} = p^4 = 0,988$.

В случае если локальная изменчивость по времени координаты $\alpha_{vz}(t)$ проявляется достаточно слабо, то модуль коэффициента корреляции K_{α} оказывается крайне малым или вообще $K_{\alpha} \rightarrow 0$. В системах контроля данных такая ситуация называется флэтом (боковым трендом). При техническом анализе на основе экспертных оценок необходимо задать некоторое пороговое значение $K_{\text{флэт}}$, ниже которого принимается решение о наличии флэта, если $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$. Выявление локального флэта или отсутствия выраженной локальной тенденции не исключает наличие тренда на более продолжительном интервале времени, что требует организации дополнительного контроля.

Правоммерно допустить, что выраженная локальная тенденция или флэт выявлены только в том случае, если из четырех смежных отсчетов имеет место выход из допустимой зоны не более одного значения. Если имеет место выход за пределы зоны двух результатов наблюдений, то вероятность наличия невыявленной (скрытой) локальной тенденции или флэта оценивается крайне низким значением 0,00003. В том случае, если локальная тенденция или флэт вообще отсутствуют, то, по крайней мере, два из четырех или все результаты наблюдений координаты $\alpha_{vz}(t)$ будут находиться вне рассматриваемой зоны тренда, а миграция координаты, скорее всего, обусловлена хаотическими случайными колебаниями.

На следующем шаге рассматриваются отсчеты $\alpha_{vz}(t_i + \Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 1 = t_i + 2\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 2 = t_i + 3\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 3 = t_i + 4\Delta t)$, по их значениям строится зависимость $A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i + 1, t) \pm \pm 3\sigma_{vz}$ для нового шага и делается вывод о проявлении локальной тенденции на отрезке, сдвинутом по времени вперед на один квант Δt относительно предыдущего i -го шага. Аналогичным образом проводятся операции с отсчетами $\alpha_{vz}(t_i + 2\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 1 = t_i + 3\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 2 = t_i + 4\Delta t)$; $\alpha_{vz}(t_i + 3 = t_i + 5\Delta t)$, строится и анализируется зависимость $A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i + 2, t) \pm 3\sigma_{vz}$. Эти действия в определенной степени напоминают технологию формирования скользящей средней [11, 12].

Особенностью выводов, которые формируются на каждом из трех шагов, является то,

что они не могут быть отнесены ни к категории четких, ни к категории вероятностных. По природе явлений эти выводы целесообразно относить к нечетким, и можно говорить только о некоторой степени уверенности в правомочности выводов в зависимости от ситуаций, складывающихся на рассматриваемых интервалах времени. Обязательной операцией является сопоставление выводов, сделанных в результате анализа зависимостей $A_{vz}(t)$ каждой тройки предыдущего, текущего и последующего шагов. Важнейшее значение в этом вопросе имеет последовательность, в которой проявляются или не проявляются локальные тенденции или флэт. В целях обеспечения формального анализа введем группу лингвистических переменных с соответствующими терм-множествами.

Для отражения факта выявления и оценки характера локальной тенденции изменения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или флэта на i -м шаге воспользуемся лингвистической переменной LTS , которую зададим с помощью трех возможных нечетких переменных из ее терм-множества [14, 15]:

- указателя тенденции нарастания значения координаты или проявления "+флэта" LTH ;
- указателя тенденции убывания значения координаты или проявления "-флэта" LTL ;
- указателя отсутствия выраженной тенденции LTN .

Лингвистическая переменная HTS будет отражать на шаге $i + 1$ факт подтверждения наличия и характера тенденции изменения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или флэта, выявленных на i -м шаге. Ее зададим тремя нечеткими переменными из терм-множества лингвистической переменной HTS :

- указателем подтверждения тенденции нарастания значения координаты или проявления "+флэта" HTH ;
- указателем подтверждения тенденции убывания значения координаты HTL или проявления "-флэта";
- указателем отсутствия выраженной тенденции HTN .

Кроме того, введем лингвистическую переменную устойчивости подтвержденной тенденции STS изменения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или флэта на шаге $i + 2$. Она может быть задана с помощью трех нечетких переменных из терм-множества лингвистической переменной STS :

- указателя устойчивости тенденции нарастания значения координаты STH или проявления "+флэта";
- указателя устойчивости тенденции убывания значения координаты STL или проявления "-флэта";
- указателя отсутствия выраженной тенденции STN .

Указатели "+флэт" и "-флэт" фиксируют не только факты наличия флэта, но учитывают и направленность корреляционных связей по времени.

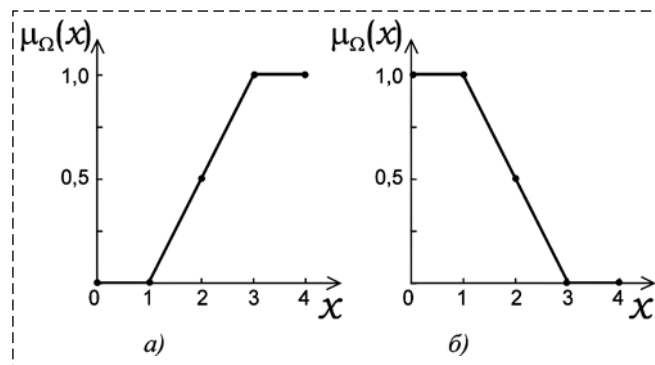
Нечеткие переменные определяются трехместными кортежами:

$$\langle \Omega, X, \mu_{\Omega}(x) \rangle,$$

где Ω — наименование (идентификатор) нечеткой переменной; X — область определения нечеткой переменной (в рассматриваемой ситуации это дискретные значения 0; 1; 2; 3; 4 — число точек, попадающих внутрь зоны тренда $A_{vz}(t) = A_{vz}(t_i, t) \pm 3\sigma_{vz}$; $\mu_{\Omega}(x)$ — функция принадлежности, заданная на множестве X и определяющая степень уверенности в том, что $\Omega = x$, т. е. x является значением нечеткой переменной [14, 15].

По своей сути каждая из лингвистических переменных LTS , HTS , STS как бы "реализуется" с помощью набора свойственных ей нечетких переменных, число идентификаторов которых в каждом наборе равно трем, что соответствует мощности терм-множеств введенных лингвистических переменных $LTS = \{LTH, LTL, LTN\}$, $HTS = \{HTH, HTL, HTN\}$, $STS = \{STH, STL, STN\}$.

На рис. 1 представлены возможные функции принадлежности рассматриваемых нечетких



Возможные функции принадлежности нечетких переменных:
 $a - K_{ta} > 0, \Omega = LTH, HTH, STH; K_{ta} < 0, \Omega = LTL, HTL, STL$;
 $b - K_{ta} > 0, K_{ta} < 0, \Omega = LTN, HTN, STN$

переменных. Нечеткие переменные с идентификаторами *LTH*, *HTH*, *STH* и *LTL*, *HTL*, *STL* имеют одинаковые функции принадлежности и являются дополнениями функций принадлежности нечетких переменных *LTN*, *HTN*, *STN*.

Определение тенденций миграции значений контролируемых системных параметров

Для формирования выводов о наличии того или иного тренда с учетом последовательности, в которой проявляются или не проявляются локальные тенденции или флэт, а также в целях реализации трехшаговой схемы динамического отслеживания контролируемых координат $\alpha_{vz}(t)$ формально заменим с помощью двоичных триад возможные значения функций принадлежности $\mu_{\Omega}(x)$ нечетких переменных Ω их кодовыми представлениями (кодовыми аналогами) $\mu d_{\Omega}(x)$ (табл. 1). Кодовые аналоги $\mu d_{\Omega}(x)$ нечетких переменных с помощью двоичных триад обеспечивают выполнение кодовой фаззификации этих переменных на основании текущих значений переменной x .

Для отображения фактов существования и характеров краткосрочных трендов введем результирующую лингвистическую переменную *TREND* с функцией принадлежности $\mu d_{TREND}(x)$. Формальный прием использования кодовых представлений функций принадлежности $\mu d_{\Omega}(x)$ нечетких переменных позволяет системным аналитикам сформировать 108 различных вариантов продукционных правил относительно значений результирующей лингвистической переменной *TREND*. Однако далеко не все из них могут иметь реальный технический смысл и могут применяться в практических целях.

Таблица 1

Кодовые представления нечетких переменных

Кодовые аналоги	$K_{I\alpha} > 0$			$K_{I\alpha} < 0$		
	$x = 0$ или 1	$x = 2$	$x = 3$ или 4	$x = 0$ или 1	$x = 2$	$x = 3$ или 4
$\mu d_{LTH}(x) = \mu d_{HTH}(x) = \mu d_{STH}(x) =$	100	110	111	100	100	100
$\mu d_{LTN}(x) = \mu d_{HTN}(x) = \mu d_{STN}(x) =$	111	110	100	011	010	000
$\mu d_{LTL}(x) = \mu d_{HTL}(x) = \mu d_{STL}(x) =$	000	000	000	000	010	011

Два продукционных правила носят аксиоматический характер и задают условия гарантированного отсутствия выраженных тенденций:

IF $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 100100100$
THEN
TREND = $\langle$ Гарантированное отсутствие нарастающего тренда или "+флэта" $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = 1 - \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
IF $\mu d_{LTL}(x) \blacksquare \mu d_{HTL}(x) \blacksquare \mu d_{STL}(x) = 000000000$
THEN
TREND = $\langle$ Гарантированное отсутствие убывающего тренда или "-флэта" $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = 1 - \min\{\mu_{LTL}(x), \mu_{HTL}(x), \mu_{STL}(x)\} = 1$.

Для агрегирования подусловий используется операция конкатенации $\blacksquare$ — операция "склеивания" кодов триад:

$$b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \blacksquare b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \blacksquare b_{31} \ b_{32} \ b_{33} = b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \ b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \ b_{31} \ b_{32} \ b_{33}.$$

Возможные решения о проявлении устойчивого тренда нарастания значения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ или "+флэта" на шагах $i, i + 1, i + 2$ могут быть получены с помощью следующих продукций относительно лингвистической переменной *TREND* с функцией принадлежности $\mu_{TREND}(dx)$:

A $\rightarrow$ IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 111111111$
THEN TREND = $\langle$ Устойчивый нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
B $\rightarrow$ IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTN}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 100111111$
THEN TREND = $\langle$ Нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTN}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
B $\rightarrow$ IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTN}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 111100111$
THEN TREND = $\langle$ Нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTN}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;
Г $\rightarrow$ IF $|K_{I\alpha}| > K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STN}(x) = 111111100$
THEN TREND = $\langle$ Неустойчивый нарастающий тренд $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STN}(x)\} = 1$;
Д $\rightarrow$ IF $|K_{I\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu d_{LTH}(x) \blacksquare \mu d_{HTH}(x) \blacksquare \mu d_{STH}(x) = 111111111$
THEN TREND = $\langle$ Устойчивый "+флэт" $\rangle$;
 $\mu_{TREND}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;

Е → IF $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu_{d_{LTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{HTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{STH}}(x) = 100111111$
 THEN TREND = <"+"флэт">;
 $\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;

Ж → IF $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu_{d_{LTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{HTN}}(x) \blacksquare \mu_{d_{STH}}(x) = 111100111$
 THEN TREND = <"+"флэт">;
 $\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTN}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1$;

З → IF $|K_{\alpha}| < K_{\text{флэт}}$ & $\mu_{d_{LTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{HTH}}(x) \blacksquare \mu_{d_{STN}}(x) = 111111100$
 THEN TREND = <Неустойчивый "+"флэт">;
 $\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STN}(x)\} = 1$.

Эти же продукции при внесении изменений в условия их реализации путем соответствующей замены нечетких переменных *LTH*, *HTH*, *STH* на переменные *LTL*, *HTL*, *STL* и при замене ожидаемых результатов логических операций на соответствующие значения 011011011, 000011011, 011000011, 011011000 позволяют получить следующие решения относительно переменной TREND с единичными значениями функций принадлежности $\mu_{\text{TREND}}(x)$:

А → <Устойчивый убывающий тренд>;
Б, В → <Убывающий тренд>;
Г → <Неустойчивый убывающий тренд>;
Д → <Устойчивый "–флэт">;
Е, Ж → <"–флэт">; **З** → <Неустойчивый "–флэт">.

Если тренд нарастания или "+"флэт" не выявлены, то должно быть проверено наличие убывающего тренда или "–флэта". Их отсутствие позволяет сделать предварительный вывод о хаотической миграции значения контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ в границах установленного допуска.

На практике, если такие потребности возникают, могут быть синтезированы и другие виды продукционных правил, однако значения функций принадлежности $\mu_{\text{TREND}}(x)$ не будут превосходить 0,5, и выводы следует относить к категории предварительных. Эту сравнительно невысокую степень уверенности необходимо учитывать при системном использовании результатов, которые, по сути, оказываются ненадежными, но, тем не менее, дают представления о возможных тенденциях развития процессов в системах.

Окончательные выводы можно сделать после дополнительной проверки выполнения неравенств следующего вида:

$$K_{\alpha} > 0; M_{\alpha}(\text{шаг } 1) < M_{\alpha}(\text{шаг } 2) < M_{\alpha}(\text{шаг } 3);$$

$$K_{\alpha} < 0; M_{\alpha}(\text{шаг } 1) > M_{\alpha}(\text{шаг } 2) > M_{\alpha}(\text{шаг } 3).$$

При выполнении первого неравенства может быть принято решение о наличии нарастающего тренда или "+"флэта", а во втором случае — о наличии убывающего тренда или "–флэта".

Реальный интерес представляют решения, получаемые по результатам реализации продукций А, Б, В. Эти решения позволяют прогнозировать ожидаемое число циклов функционирования системы и проведения наблюдений, за время выполнения которых при сохранении выявленной тенденции и скорости миграции K_{α}/D_i значение контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ выйдет на границу установленного допуска:

$$\text{при } K_{\alpha} > 0 \quad N_{\Pi} = \text{mod}\{D_i[\alpha_{vz \text{ в }} - \alpha_{vz}(t_i + 5\Delta t)]/[K_{\alpha}\Delta t]\};$$

$$\text{при } K_{\alpha} < 0 \quad N_{\Pi} = \text{mod}\{D_i[\alpha_{vz \text{ н }} - \alpha_{vz}(t_i + 5\Delta t)]/[K_{\alpha}\Delta t]\}.$$

В качестве примера рассмотрим ряд в виде последовательности наблюдений в дискретные моменты времени значений некоторой контролируемой координаты $\alpha_{vz}(t)$ при $\sigma_{\alpha} = 1,3$; $K_{\text{флэт}} = 1$ (табл. 2).

Для трех последовательных шагов анализа все уравнения зон трендов имеют вид убывающих линейных функций:

$$A_{vz(\text{шаг } 1)} = -11,4t + 38,6 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 2)} = -7t + 29,0 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 3)} = -3,9t + 19,4 \pm 3\sigma_{\alpha}.$$

На первом шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 1)}$ попадают четыре значения: 42, 24, 12, 8; на втором шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 2)}$ входят следующие четыре значения: 24, 12, 8, 2; на третьем шаге в зоне $A_{vz(\text{шаг } 3)}$

Таблица 2

Последовательность наблюдений контролируемой координаты

Отсчет	0	1	2	3	4	5
$\alpha_{vz}(t)$	42	24	12	8	2	1
$\alpha_{vz}^*(t)$	42	24	12	19	2	1

окажутся значения 12, 8, 2 и 1. Таким образом, после кодовой фаззификации может быть синтезировано продукционное правило с единственным значением обычной функции принадлежности для результирующей переменной TREND, которое выявляет устойчивый убывающий тренд:

$$IF |K_{\alpha}| > K_{\text{флэт}} \ \& \ \mu_{LTH}(x) \blacksquare \mu_{HTH}(x) \blacksquare \mu_{STH}(x) = 011011011$$

THEN TREND = <Устойчивый убывающий тренд>;

$$\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTH}(x), \mu_{HTH}(x), \mu_{STH}(x)\} = 1.$$

При тех же условиях изменим одно значение в последовательности наблюдений ($\alpha_{vz}^*(t)$; см. табл. 2). В этом случае для трех последовательных шагов уравнения зон трендов принимают следующий вид:

$$A_{vz(\text{шаг } 1)} = -8,1t + 36,4 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 2)} = -5,9t + 29,0 \pm 3\sigma_{\alpha};$$

$$A_{vz(\text{шаг } 3)} = -5t + 26,0 \pm 3\sigma_{\alpha}.$$

На первом шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 1)}$ попадает только одно значение 24; на втором шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 2)}$ попадают два значения: 24 и 2; на третьем шаге в зону $A_{vz(\text{шаг } 3)}$ входят также два значения: 12 и 1. Таким образом, после кодовой фаззификации переменных может быть синтезирована продукция со значением обычной функции принадлежности 0,5. Эта продукция в явном виде не выявляет тренд:

$$IF |K_{\alpha}| > K_{\text{флэт}} \ \& \ \mu_{LTN}(x) \blacksquare \mu_{HTL}(x) \blacksquare \mu_{STL}(x) = 000010010$$

THEN TREND = <Тренд не выявлен>;

$$\mu_{\text{TREND}}(x) = \min\{\mu_{LTN}(x), \mu_{HTL}(x), \mu_{STL}(x)\} = 0,5.$$

Дополнительная проверка дает следующий результат, который позволяет принять решение о наличии убывающего тренда:

$$K_{\alpha} < 0; M_{\alpha(\text{шаг } 1)} = 24,25 > M_{\alpha(\text{шаг } 2)} = 14,25 > M_{\alpha(\text{шаг } 3)} = 8,5.$$

Заключение

Использование в составе интеллектуальных мехатронных систем средств вычислительной техники и переход на цифровые методы об-

работки информации создают техническую основу для оперативного формирования временных рядов факторных и результативных системных параметров. Применение приемов предварительной обработки временных рядов ограниченной протяженности и предсказание направленности ожидаемого развития системных процессов позволяют оперативно выявлять в системе зарождение опасных тенденций в миграции значений контролируемых параметров к границам допусковых диапазонов. Для наделения системы указанными свойствами в целях принятия текущих решений о выявлении негативной направленности трендов предложено циклическое использование процесса непрерывного динамического отслеживания временных рядов отдельных контролируемых параметров и применение аппарата нечеткой логики с кодовой фаззификацией.

Выработка решений об устойчивости нарастания или убывания отдельных параметрических трендов или о наличии трендовых флэтов может осуществляться с помощью конечного набора продукционных правил, которые образуют последовательную структуру логических выводов. В логическом отношении наиболее просто процедуры отслеживания миграций параметров и продукционные правила выработки решений реализуются на процессорах, которые поддерживают операции с плавающей точкой и логические поразрядные операции. При использовании процессоров, не поддерживающих указанные операции, необходимо дополнительное применение методов арифметического масштабирования и программируемой логики.

Список литературы

1. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 1991.
2. Фомин В. Н. Рекуррентное оценивание и адаптивные фильтры. М.: Наука, 1984.
3. Willski A. S. A survey of design methods for dynamical systems // Automatic Journal of IFAC. 1976. Vol. 12, N. 6. P. 601–611.
4. Sastri T., Flores B., Valdes J. Detection points of change in time series // Computers and Operations Research. 1989. Vol. 16, N. 3. P. 271–273.
5. Szeliski R. Computer Vision Algorithms and Applications. Washington: Springer, 2011.
6. Постон Р., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М.: Мир, 1980.
7. Арнольд В. И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990.
8. Том Р. Структурная устойчивость и морфогенез. М.: Логос, 2002.
9. Gilmore R. Catastrophe Theory for Scientists and Engineers. N. Y.: Dover, 1993.

10. **Карибский В. В., Пахоменко П. П., Согомонян Е. С., Халчев В. Ф.** Основы технической диагностики. М.: Энергия, 1976.

11. **Питерс Т., Барлетта М.** Основы. Тренды. СПб.: Издательство Стокгольмской школы экономики в С.-Петербурге, 2006.

12. **Мэрфи Д.** Технический анализ фьючерсных рынков. М.: Альпина Паблишер, 2011.

13. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

14. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.

15. **Штовба С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия, 2007.

Digital Control of Tendencies of Sensor Parameters Changing in Intelligent Systems

A. V. Gulay, is@bntu.by, **V. M. Zaitsev**, is@bntu.by
Belorussian National Technical University

Corresponding author: **Gulay Anatoly V.**, Ph.D., Associate Professor, Chief of Department,
Belorussian National Technical University, Minsk, 220065, Republic of Belarus

Accepted on February 02, 2018

Current states of mechatronic systems and the state of control objects in every cycle of functioning are usually evaluated with the aid of a set of values of controlled parameters, which are formed with measuring tracts of the system on the basis of signals of sensors. Presently, methods of the analysis of trends of changing the system parameters and control of their location within the limits of warning and emergency intervals are widely used in mechatronics. However, this provides identification of facts of development of already formed negative tendencies, when urgent managerial decisions and technical measures are required for avoidance of emergency situations. More effective control may be implemented during early assessment of the events, what is very important for mechatronic systems, in which systematic processes relatively quickly take place. In connection therewith the cyclic use has been considered of the three-stage process of continuous dynamic tracing of temporary rows of controlled parameters and the use of a fuzzy logic apparatus with the coded fuzzyfication for taking operative decisions about discovery of negative trends in each of five consecutive intervals of observation. Development of solutions in the mechatronic system about the steady increment or decrease of individual parametrical trends or availability of trend flats can be carried out with the aid of a finite set of production rules, which form a consecutive structure of logical conclusions. As for the logic of the simplest procedures of tracing the migration of parameters and production rules of generation of solutions are implemented in processors which support operations with a floating point and logical digit-to-digit operations.

Keywords: intelligent system; sensor control; digital control; migration of parameters; short-term trend.

For citation:

Gulay A. V., Zaitsev V. M. Digital Control of Tendencies of Sensor Parameters Changing in Intelligent Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 442–450.

DOI: 10.17587/mau.19.442-450

References

1. **Tixonov V. I., Xarison V. N.** *Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskix ustrojstv* (Statistic analysis and synthesis of radiotechnic devices), Moscow, Radio i svjaz', 1991 (in Russian).

2. **Fomin V. N.** *Rekurrentnoe ocenivanie i adaptivnye fil'try* (Recurrent estimation and adaptive filters), Moscow, Nauka, 1984 (in Russian).

3. **Willski A. S.** A survey of design methods for dynamical systems, *Automatic Journal of IFAC*, 1976, v. 12, no. 6, pp. 601–611.

4. **Sastri T., Flores B., Valdes J.** Detection points of change in time series, *Computers and Operations Research*, 1989, vol. 16, no. 3, pp. 271–273.

5. **Szeliski R.** *Computer Vision Algorithms and Applications*, Washington, Springer, 2011.

6. **Poston T., Stewart I.** *Catastrophe theory and its applications*, London, Pitman, 1978.

7. **Arnol'd V. I.** *Teorija katastrof* (The Catastrophe Theory), Moscow, Nauka, 1990 (in Russian).

8. **Thom R.** *Stabilite structurelle et morphogenese*, Paris, InterEditions, 1977.

9. **Gilmore R.** *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers*, N. Y., Dover, 1993.

10. **Karibskij V. V., Paxomenko P. P., Sogomonjan E. S., Xalchev V. F.** *Osnovy texnicheskoj diagnostiki* (Fundamentals of technical diagnostics), Moscow, E'nergija, 1976 (in Russian).

11. **Peters T., Barletta M.** *Tom Peters Essentials Trends*, London, Dorling Kindersley, 2005.

12. **Murphy J.** *Technical Analysis of the Financial Markets*, N. J., Prentice Hall Press, 1999.

13. **Ventcel' E. S.** *Teorija veroyatnostej* (Theory of Probabilities), Moscow, Nauka, 1969 (in Russian).

14. **Zadeh L. A.** The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, N. Y., Elsevier, 1973.

15. **Shtovba S. D.** *Proektirovanie nechetkix sistem sredstvami MATLAB* (Designing of fuzzy systems by means of MATLAB facilities), Moscow, Gorjachaja linija, 2007 (in Russian).

О. С. Колосов, д-р техн. наук, проф., KolosovOS@mpei.ru,

В. А. Короленкова, студент, А. Д. Пронин, аспирант,

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва,

М. В. Зуева, д-р биол. наук, проф., зав. отделом, И. В. Цапенко, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,

Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца, Москва

Построение амплитудно-частотных характеристик сетчатки глаза и формализация их параметров для использования в системах диагностики¹

В работе последовательно решаются две задачи. Первая — это обоснование возможности построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сетчатки глаза путем обработки ритмических электроретинограмм (РЭРГ). Вторая задача — аппроксимация полученных АЧХ сетчатки глаза в целях получения дополнительных формализованных признаков текущего состояния сетчатки в виде коэффициентов аппроксимирующих полиномов. При построении АЧХ сетчатки глаза учитывается спектр входного тестирующего воздействия (стимула). Световые стимулы представляют собой периодически повторяющиеся короткие световые прямоугольные импульсы пяти стандартных частот. В силу того что сетчатка глаза является нелинейным динамическим объектом, в работе оцениваются и учитываются изменения АЧХ сетчатки при построении частотных характеристик для каждой частоты подачи световых вспышек. Для полиномиальной аппроксимации полученных АЧХ сетчатки в работе предлагается выделить две характерные области частот: область низких частот (от 0 до 50 Гц) и область высоких частот (от 50 до 120 Гц). В области низких частот предлагается сглаживать АЧХ сетчатки полиномом второй степени, а в области высоких частот — полиномом первой степени. Предлагаемая аппроксимация АЧХ позволяет для одного субъекта исследований получить 25 дополнительных признаков по пяти экспериментально найденным АЧХ. При этом каждая АЧХ характеризуется пятью коэффициентами сглаживающих полиномов. Результаты работы позволяют проводить сравнение разных способов классификации (диагностики) с использованием получаемых признаков.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, электроретинограмма, сетчатка глаза, диагностика, патология, аппроксимация

Введение

Диагностика патологических процессов в медицине с использованием современных методов построения экспертных систем реализуется для многих систем человеческого организма [1—4]. Диагностика патологий сетчатки (особенно на ранних стадиях) является одним из важнейших направлений офтальмологии [5]. Построение экспертных систем, облегчающих решение этой задачи для офтальмологов, ведется по разным направлениям, включая статистические методы, методы классификации, использование нейронных сетей и методы мягких вычислений [6—10]. Важная роль в этом процессе отводится анализу электроретинограмм (ЭРГ) [11—14]. ЭРГ — это запись изменений биопотенциала сетчатки глаза в ответ на различные виды световых раздражителей. Существуют различные виды ЭРГ, позволяющие судить о текущем состоянии

разных структурных составляющих сетчатки. Для целей диагностики используются формализованные признаки, извлекаемые из ЭРГ, такие как координаты экстремумов, запаздывания, оценки амплитуд отдельных гармоник в спектральном разложении ритмических ЭРГ (РЭРГ) и т. д., а также коэффициенты имитационных динамических моделей сетчатки [15]. Однако числовые значения подобных признаков для большинства патологий имеют существенные области взаимных пересечений. В связи с этим число информативных признаков оказывается относительно небольшим. Эти факторы осложняют построение эффективных систем диагностики. В работе решается задача пополнения базы формализованных признаков текущего состояния сетчатки глаза за счет использования коэффициентов полиномов, аппроксимирующих амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сетчатки. Для этой цели анализируется возможность построения АЧХ сетчатки глаза и оценки изменений этих характеристик сетчатки как нелинейного динамического объекта в зависимости от ча-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-01-00054).

стоты подаваемых на нее световых импульсов и предлагается способ ее аппроксимации.

В работе последовательно решаются две задачи. Первая — это обоснование возможности построения АЧХ сетчатки путем обработки ритмических ЭРГ (РЭРГ), вторая — решение задачи аппроксимации полученных АЧХ сетчатки глаза в целях получения дополнительных формализованных признаков текущего состояния сетчатки в виде коэффициентов аппроксимирующих полиномов.

1. Построение АЧХ сетчатки глаза

1.1. Исходные предпосылки

Для решения первой задачи (построения АЧХ сетчатки глаза) помимо определения спектра наблюдаемой РЭРГ [16] необходимо учитывать и спектр входного тестирующего воздействия (стимула). РЭРГ представляет собой реакцию сетчатки глаза на периодически повторяющиеся короткие световые импульсы. Существуют пять стандартных частот подачи световых вспышек: 8,3, 10, 12, 24 и 30 Гц. Исследования проводятся либо в полной темноте (скотопические РЭРГ), либо в условиях внешнего светового фона (фотопические РЭРГ). В силу того, что сетчатка глаза представляет собой нелинейный динамический объект, необходимо оценивать и учитывать изменения АЧХ сетчатки путем построения частотных характеристик для каждой частоты подачи световых вспышек. На рис. 1 представлена запись фотопической РЭРГ, проведенной на установке TOMEY EP-1000. Частота подаваемых световых импульсов составляет 8,3 Гц. Здесь же представлен амплитудный спектр наблюдаемой РЭРГ и даются цифровые характеристики первых трех гармоник разложения наблюдаемого сигнала в ряд Фурье. Параметры этих трех гармоник оказываются недостаточно информативными для использования их в экспертных системах.

Отметим, что в представленном на рис. 1 спектре РЭРГ при частоте световых вспышек 8,3 Гц отсутствуют шестая (49,8 Гц) и двенадцатая (99,6 Гц) гармоники из-за наличия в регистриру-

щем приборе фильтров-пробок, вырезающих сетевые помехи с частотами 50 и 100 Гц. Аналогично в спектре РЭРГ при подаче световых вспышек с частотой 10 Гц отсутствуют пятая и десятая гармоники.

Входной тестирующий сигнал X по существу отражает работу коммутатора, включающего и выключающего лампу-вспышку. Лампа-вспышка, обладающая своей АЧХ (W_L), преобразует входной сигнал X в изменение светового потока X_1 . Далее сетчатка глаза со своей АЧХ (W_R) преобразует световой поток в биопотенциал Y , который соответствующим прибором со своей АЧХ (W_D) регистрируется в виде РЭРГ (Z).

Таким образом, спектр регистрируемого сигнала РЭРГ $Z(f)$ представляет собой преобразованный тремя динамическими звеньями (лампа-вспышка, сетчатка и регистрирующий прибор) спектр входного сигнала $X(f)$.

Аналогом такого преобразователя для линейных динамических звеньев является модуль передаточной функции, который усиливает или ослабляет амплитуду каждой конкретной гармонической составляющей входного сигнала определенной частоты.

Оценка точек АЧХ выполняется делением амплитуд гармоник с одинаковыми номерами спектра разложения сигнала РЭРГ (Z) на амплитуды гармоник спектра разложения входного периодического сигнала (X) в виде прямоугольных импульсов. Подобный прием обоснован в работе [17].

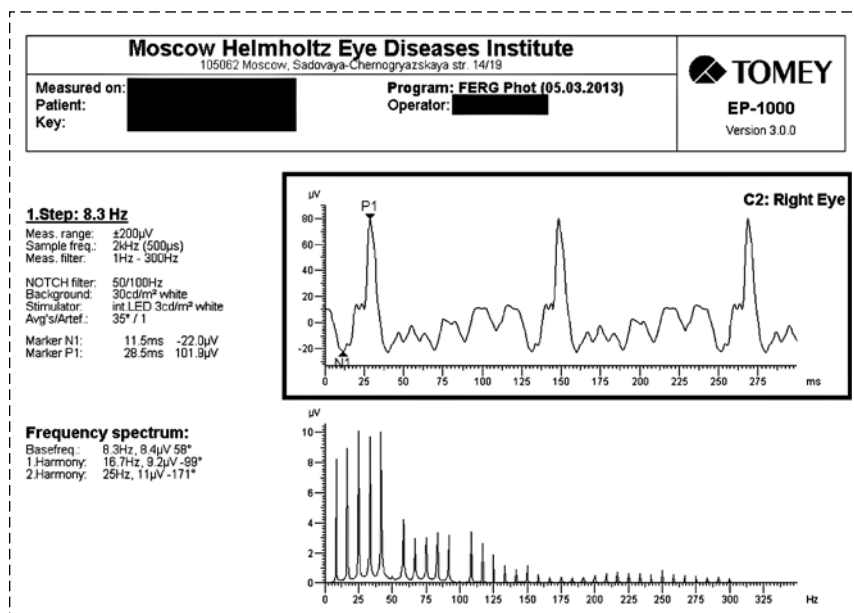


Рис. 1. Форма записи РЭРГ во времени и ее спектр

1.2. Спектр входного периодического тестирующего сигнала

Спектр входного периодического тестирующего сигнала в виде последовательности прямоугольных импульсов амплитудой A и длительностью τ вычисляется путем разложения его в ряд Фурье на временном интервале, равном одному периоду следования импульсов T_n . Аналитическая форма записи [17] для вычисления гармоник спектра с номерами $n = 1, 2, 3$ имеет следующий вид:

$$A_n(n\omega_n) = 2A \frac{\left| \sin \frac{n\omega_n \tau}{2} \right|}{\frac{n\omega_n T_n}{2}}, \quad (1)$$

где $\omega_n = 2\pi f$.

Спектр (1) является дискретным. Частота первой гармоники равна частоте следования импульсов, вторая гармоника равна удвоенной частоте и т. д. Отметим характерные особенности спектров прямоугольных импульсов:

- в спектрах отсутствуют гармоники, кратные обратной величине длительности импульса $\tau = 0,005$ с (200 Гц, 400 Гц и т. д.);
- амплитуды гармоник кратны частоте подачи импульсов.

Проведенное исследование спектров шумовых составляющих в регистрируемых РЭРГ вынуждают ограничивать построение спектра РЭРГ гармониками не выше 120...150 Гц. Фактически при построении спектра регистрируемого сигнала шумовая составляющая определяет "запретную" зону шириной 50...80 Гц с центром на частоте 200 Гц. Все остальные высокие частоты спектра наблюдаемого сигнала РЭРГ полностью определяются шумовой составляющей с характеристикой нормального белого шума с нулевым математическим ожиданием.

1.3. Частотные свойства лампы-вспышки и регистрирующего прибора

Консультации с разработчиками аппаратуры (Roland Consult и Tomey), позволяющей регистрировать РЭРГ, а также обработка результатов экспериментов показывают, что АЧХ лампы-вспышки можно представить как некоторый фиксированный коэффициент передачи K_L для всего интересующего исследователей диапазона частот. Таким образом, ее влияние может быть учтено в виде поправки амплитуды

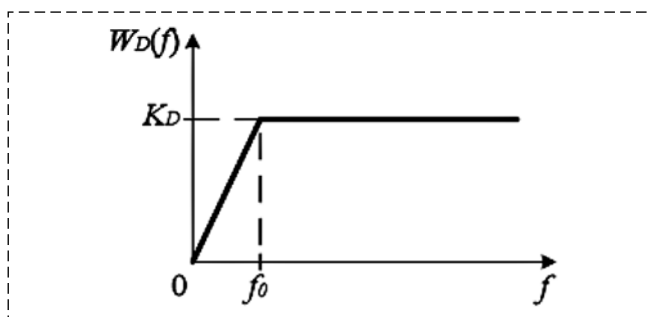


Рис. 2. АЧХ регистрирующего прибора

А входного тестирующего сигнала X . Консультации с разработчиками аппаратуры позволяют также представить АЧХ регистрирующего прибора $W_D(f)$ графически в виде, показанном на рис. 2. Нижняя граница полосы равномерного пропускания прибора примерно соответствует $f_0 = 1$ Гц (для прибора Tomey). Начиная с этой частоты на всех интересующих исследователя частотах прибор имеет равномерную полосу пропускания с коэффициентом передачи, равным K_D . Таким образом, регистрирующий прибор также может считаться линейным пропорциональным звеном в интересующей полосе пропускания. Его коэффициент передачи K_D также может быть учтен как поправка амплитуды входного сигнала A .

1.4. Построение АЧХ сетчатки глаза

Вид РЭРГ в качестве исходного сигнала, подвергаемого разложению в ряд Фурье на периоде следования импульсов с частотой 10 Гц, показан на рис. 3, а. Рассматриваются РЭРГ субъекта с нормальным зрением.

Следует отметить, что использование спектров РЭРГ для диагностики осложняется тем фактом, что амплитуды гармоник в них зависят от спектров входных сигналов, в которых согласно (1) амплитуды одноименных гармоник пропорциональны частоте подаваемых световых импульсов.

Построение АЧХ сетчатки глаза путем деления значений амплитуд гармоник спектров $Z(f)$ на соответствующие значения амплитуд гармоник входных сигналов в соответствии с выражением (1) позволяет устранить этот нежелательный эффект [17]. При этом следует отметить, что в анализируемых спектрах допустимая верхняя граница рассматриваемых частот гармоник сужается до 120...150 Гц из-за влияния спектра шумовой составляющей РЭРГ

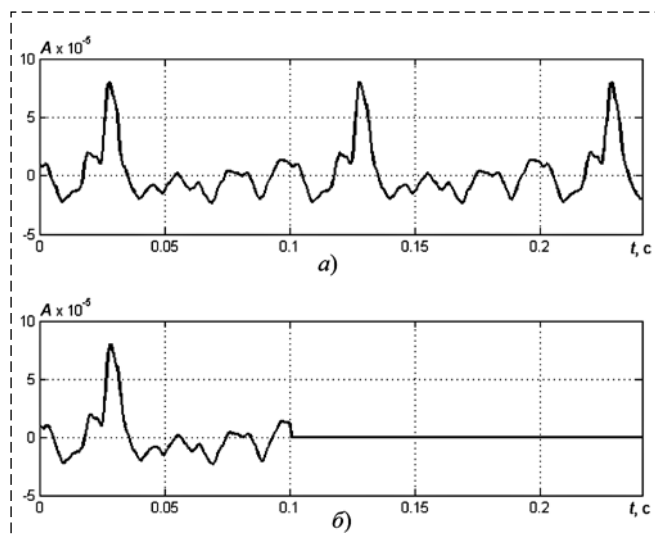


Рис. 3. Вид РЭРГ, подвергается разложению в ряд Фурье: а — исходная (10 Гц); б — удлинение периода нулевыми значениями (псевдочастота подачи импульсов 4,15 Гц)

на вид АЧХ в окрестности критической частоты 200 Гц, где амплитуды гармоник спектра входного импульса близки к нулевым значениям. Это обстоятельство приводит к тому, что число точек АЧХ для разных частот подачи световых импульсов получается разным и для высоких частот весьма малым. Например, для частоты подачи импульсов 30 Гц таких точек будет 4–5.

Промежуточные точки АЧХ сетчатки можно получить искусственным удлинением периода разложения наблюдаемого сигнала (или "окна") нулевыми значениями, которое применяется в радиотехнике для определения боковых гармоник исследуемого сигнала [18, 19]. В этих работах проводится спектральный анализ непрерывного сигнала с нулевым математическим ожиданием (для РЭРГ это условие обеспечивается наличием фильтра высоких частот регистрирующего прибора) так называемым методом окон. Кроме этого, исследования показывают, что в сетчатке заканчиваются переходные процессы к приходу очередного импульса. Этот фактор является определяющим при использовании подобного приема увеличения периода нулевыми значениями [17].

В нашем случае, условно задерживая приход следующего светового импульса на определенное время и продливая на это же время нулевыми значениями выходной сигнал, мы искусственно увеличиваем период следования импульсов. При этом мы можем получить промежуточные (дополнительные) точки АЧХ сетчатки глаза.

На рис. 3, б показано удлинение периода обрабатываемого сигнала РЭРГ (сигнал 10 Гц на входе) нулевыми значениями. При этом длительность такого периода соответствует подаче на вход световых импульсов с псевдочастотой 4,15 Гц.

На рис. 4 представлены АЧХ сетчатки глаза здорового субъекта с искусственным удлинением периода следования световых импульсов (псевдочастота подачи импульсов 1 Гц). Здесь же помечены кружками точки АЧХ этого же субъекта, полученные в результате обработки исходной РЭРГ, показанной на рис. 3, а.

Отметим, что на рис. 4 просматривается влияние на АЧХ сетчатых фильтров пробок регистрирующего прибора, о которых шла речь выше, при частотах подачи световых импульсов 8,3, 10 Гц. В дальнейших обработках гармоники с этими частотами просто пропускались.

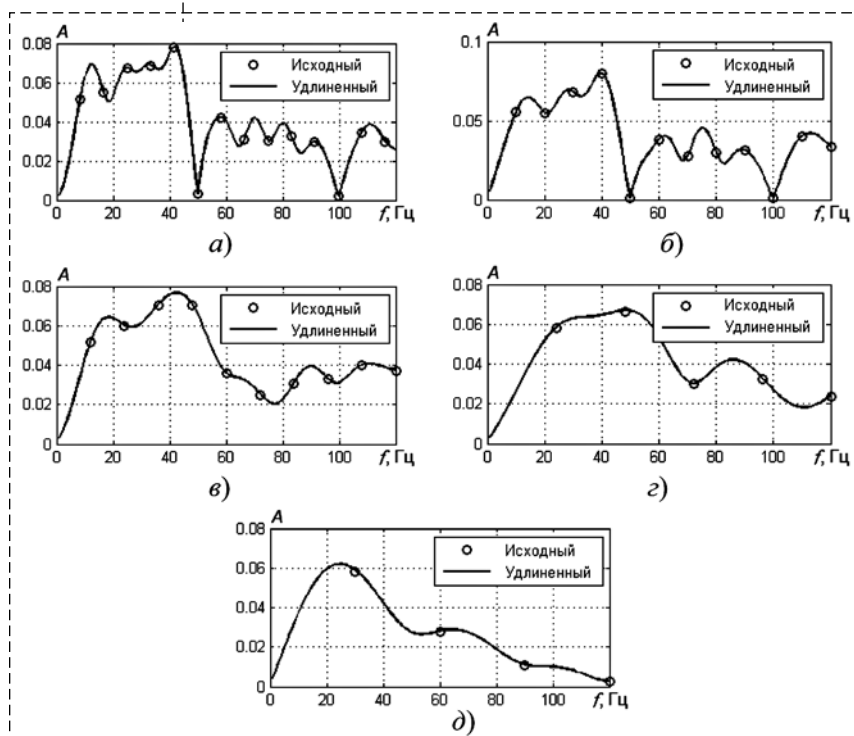


Рис. 4. Семейство АЧХ сетчатки глаза с искусственным удлинением периода следования световых импульсов (псевдочастота подачи импульсов 1 Гц). Исходные частоты подачи импульсов:

а — 8,3 Гц; б — 10 Гц; в — 12 Гц; г — 24 Гц; д — 30 Гц

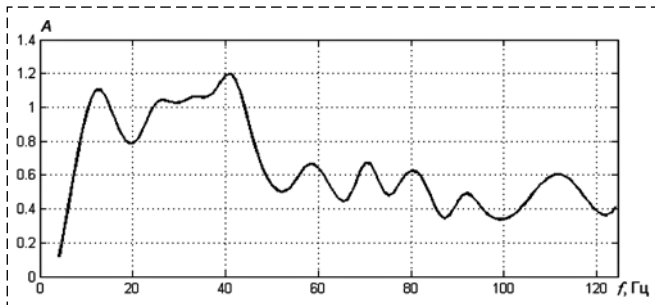


Рис. 5. АЧХ сетчатки субъекта с нормальным зрением (8,3 Гц) при удлинении периода

Заметим, что АЧХ сетчатки с увеличением частоты подачи импульсов постепенно опускаются, т. е. передающие свойства сетчатки ослабевают. Помимо этого в области низких частот АЧХ демонстрируют наличие фильтра, не пропускающего низкие частоты. Подобными фильтрующими свойствами, как отмечалось выше, обладает регистрирующий прибор.

Оцифровка оси ординат на рис. 4 проводится в относительных единицах. Подбором значения амплитуды входного сигнала (A) АЧХ сетчатки конкретного здорового субъекта целесообразно сверху ограничить условной единицей или близким к единице значением, как это показано на рис. 5. Это условие позволяет проводить сравнение АЧХ пациентов с разными патологиями сетчатки.

2. Полиномиальная аппроксимация АЧХ сетчатки глаза

Анализ большого числа АЧХ сетчаток глаз с различными патологиями показывает нецелесообразность их аппроксимации одним степенным полиномом из-за больших значений суммы квадратов невязок между аппроксимирующим полиномом и самой АЧХ. Значительно уменьшить значения невязок удастся, если выделить две характерные области частот: область

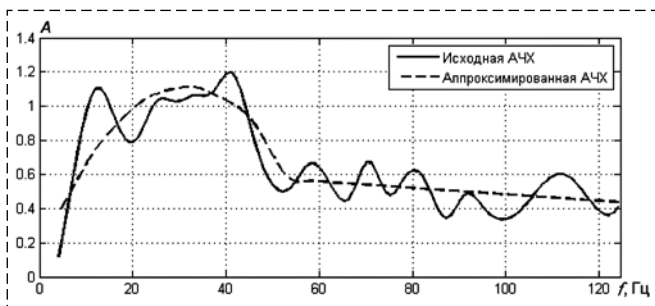


Рис. 6. Совмещенные исходная и аппроксимированная АЧХ

низких частот (от нуля до 50 Гц) и область высоких частот (от 50 до 120 Гц). В области низких частот предлагается сглаживать АЧХ полиномом второй степени, а в области высоких частот — полиномом первой степени. Результат подобной аппроксимации показан на рис. 6.

Результаты аппроксимации представлены зависимостями $N(f)$:

$$N(f) = \begin{cases} 0,13705 + 0,06206f - 0,00099f^2, & 8,3 \leq f \leq 45,65; \\ 0,67308 - 0,00189f, & 53,95 \leq f \leq 124,5. \end{cases}$$

Пять получаемых коэффициентов полиномов могут быть использованы как дополнительные признаки в создаваемых системах диагностики.

Зная АЧХ здорового субъекта с нормальным зрением, сравним с ней АЧХ пациентов с патологией сетчатки. На рис. 7 представлены совмещенные АЧХ здорового субъекта (верхняя сплошная кривая), субъектов с подозрением на глаукому (две средние штриховые кривые) и с глаукомой (две нижние штрихпунктирные кривые) для частоты стимуляции 8,3 Гц с удлинением периода нулевыми значениями (псевдочастота подачи импульсов 4,15 Гц).

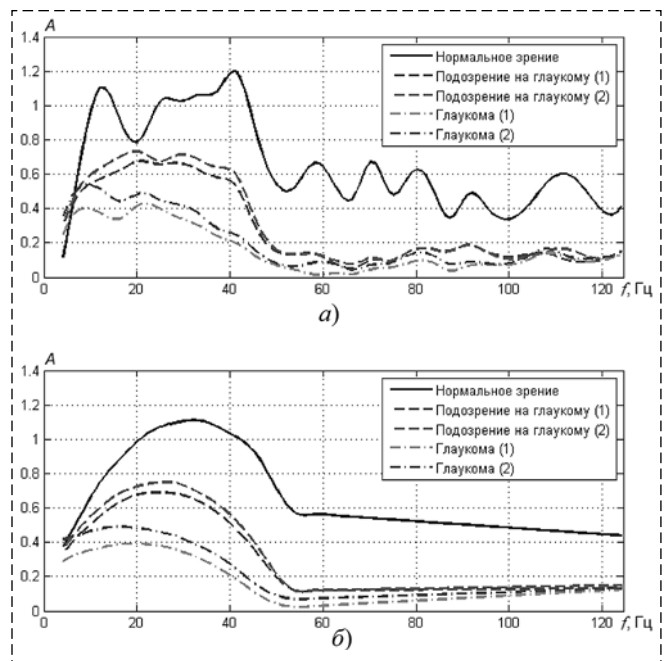


Рис. 7. АЧХ здорового субъекта, субъектов с подозрением на глаукому и с глаукомой для частоты стимуляции 8,3 Гц с удлинением периода нулевыми значениями (псевдочастота подачи импульсов 4,15 Гц):
а — исходные АЧХ; б — аппроксимированные АЧХ

Полученные АЧХ сетчатки глаз субъектов отражают их свойства преобразовывать (усиливать или ослаблять) соответствующие амплитуды гармоник спектра входного сигнала.

Заключение

Представленные в работе результаты демонстрируют возможность построения амплитудно-частотных характеристик сетчатки глаза при воздействии на нее сериями световых вспышек (стимулов) различных стандартных частот. Показано, что предлагаемая аппроксимация получаемых АЧХ сетчатки глаза позволяет для одного субъекта исследований получить 25 дополнительных числовых признаков по пяти экспериментально найденным АЧХ за счет предлагаемой полиномиальной аппроксимации их в двух выделенных областях частот. Исследования АЧХ сетчатки глаза для разных видов патологий позволяют определить области изменений этих признаков и их взаимные пересечения. Эти области с уже имеющимися областями значений признаков, извлекаемых из самих ЭРГ, могут быть использованы при разработке и совершенствовании систем диагностики патологий сетчатки глаза.

Список литературы

1. Гублер Е. В. Вычислительные методы анализа и распознавания патологических процессов. Л.: Медицина, 1978. 296 с.
2. Корневский Н. А., Снопков В. Н., Бурмака А. А., Рябкова Е. Б. Проектирование медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе нечетких информационных технологий // Врач и информационные технологии. 2013. № 6. С. 48–53.
3. Мисюк Н. С. ЭВМ в диагностике нервных болезней. Минск: Беларусь, 1978. 159 с.

4. Реброва О. Ю. Математические алгоритмы и экспертные системы в дифференциальной диагностике инсультов: Дис. на соискание ученой степени докт. мед. наук. Москва, 2003. 325 с.
5. Бакуткин В. В., Зайко Ю. Н., Лепеско А. С., Скиданов А. Н. Разработка системы классификации и диагностики офтальмологических заболеваний на основе искусственных нейронных сетей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2008. № 1, Т. 8. С. 36–41.
6. Дьяконов Д. Г. Анализ данных, обучение по прецедентам, логические игры, системы WEKA, RapidMiner и Matlab: учеб. пособ. М.: Издательский отдел факультета ВМК МГУ им. М. В. Ломоносова. 2010. 278 с.
7. Hall Mark, Frank Eibe, Holmes Geoffrey, Pfahringer Bernhard, Reutemann Peter, Witten Ian H. The WEKA data mining software: an update // SIGKDD Explorations. 2009. Vol. 11, July. P. 10–18.
8. Воронцов К. В. Курс лекций по методам оценивания и выбора моделей. URL: <http://www.kdd.org/explorations/issues/11-1-2009-07/p2V11n1.pdf>
9. Dembele D., Kastner P. C-means method for clustering microarray data // Bioinformatics. 2003. Vol. 19(8). P. 973–980.
10. Орлов А. И. Прикладная статистика. М.: Издательство "Экзамен", 2004. 656 с.
11. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2001.
12. Perlman I. The Electroretinogram: ERG. URL: <http://www.webvision.ERG>.
13. Zueva M., Tsapenko I., Vaskov S. The components of human and rabbit 8-Hz and 12-Hz flicker ERG as a function on intensity, size and position of stimuli // Abstracts of 42nd ISCEV Symposium (San Juan). 2004. P. 132.
14. Marmor F., Fulton A. B., Holder G. E., Miyake Y., Brigell M., Bach M. // ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography (2008 update). Doc Ophthalmol. 2009. Vol. 118. P. 69–77.
15. Anisimov D. N., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Zueva M. V., Tsapenko I. V. Diagnosis of the Current State of Dynamic Objects and Systems with Complex Structures by Fuzzy Logic Using Simulation Models // Scientific and Technical Information Processing. 2013. Vol. 40, N. 6. P. 365–374.
16. Jenkins G. M., Watts D. G. Spectral Analysis and Its Applications. San Francisco, CA: Holden-Day, 1968.
17. Колосов О. С., Баларев Д. А., Пронин А. Д., Зуева М. В., Цапенко Ц. В. Оценка частотных свойств динамического объекта с использованием импульсных тестирующих сигналов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 4. С. 219–226.
18. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособ.: СПб. БХВ-Петербург, 2013. 768 с.
19. Применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Э. Оппенгейма, Пер. с англ. под ред. А. М. Рязанцева. М.: Мир, 1980.

Obtaining the Amplitude-Frequency Response of the Retina and Formalization of its Parameters for Using in Diagnostic Systems

O. S. Kolosov, Dr.Sci. (Techn.), Professor, KolosovOS@mpei.ru,

V. A. Korolenkova, Student, A. D. Pronin, Postgraduate,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation,

M. V. Zueva, Dr.Sci. (Biol.), I. V. Tsapenko, Ph.D. (Biol.),

Moscow R&D Institute of Eye Illness named after Gelmholtz of Federal Agency
on high-technology medical assistance, Moscow, 105062, Russian Federation

Corresponding author: Kolosov Oleg S., Dr. Sci. (Techn.), Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: KolosovOS@mpei.ru

We consider two problems in this work. The first is the justification for the possibility of obtaining the amplitude-frequency response (AFR) of the retina by processing rhythmic electroretinograms (RERG). The second problem is to approximate the obtained AFR of the retina in order to obtain additional formalized features of the current state of the retina in the form of the coefficients of the approximating polynomials. When we obtain the AFR of the eye retina, we take into consideration the spectrum of the input testing signal (stimulus). Light stimuli are periodically repeated short rectangular light pulses of five standard frequencies. Due to the fact that the retina is a nonlinear dynamic object, the changes in the AFR of the retina are evaluated and taken into consideration in the obtaining of the frequency characteristics for each frequency of light flashes. For the polynomial approximation of the obtained AFR's of the retina, it is proposed to distinguish two frequency ranges: the low-frequency range (from 0 to 50 Hz) and the high-frequency range (from 50 to 120 Hz). In the low-frequency range it is proposed to smooth the retinal AFR by the second degree polynomial smoothing, and in the high-frequency range — by the first degree polynomial smoothing. The proposed approximation of the frequency response allows to obtain 25 additional features from five experimentally determined AFR's for one person. In this case each AFR is characterized by five coefficients of smoothing polynomials. The results of the work allow us to compare different methods of classification (diagnosis) with using the received features.

Keywords: amplitude-frequency response, electroretinogram, retina, diagnosis, pathology, approximation.

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-01-00054).

For citation:

Kolosov O. S., Korolenkova V. A., Pronin A. D., Zueva M. V., Tsapenko I. V. Obtaining the Amplitude-Frequency Response of the Retina and Formalization of its Parameters for Using in Diagnostic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 451–457.

DOI: 10.17587/mau.19.451-457

References

1. Gubler E. V. *Vychislitel'nye metody analiza i raspoznavaniya patologicheskikh processov* (Computational methods of analysis and recognition of pathological processes), Leningrad, Medicina, 1978 (in Russian).
2. Korenevskij N. A., Snopkov V. N., Burmaka A. A., Rjabkova E. B. *Proektirovanie medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinjatija reshenij na osnove nechetkih informacionnyh tehnologij* (Design of medical intelligent decision support systems based on fuzzy information technology), *Vrach i Informacionnye Tehnologii*, 2013, no. 6, pp. 48–53 (in Russian).
3. Misjuk N. S. *JeVM v diagnostike nervnyh boleznej* (Computer in the diagnosis of nervous diseases), Minsk, Belarus', 1978 (in Russian).
4. Rebrova O. Ju. *Matematicheskie algoritmy i jekspertnye sistemy v differencial'noj diagnostike insul'tov. Dokt. diss.* (Mathematical algorithms and expert systems in differential diagnosis of strokes. Doct. diss.), Moscow, 2003 (in Russian).
5. Bakutkin V. V., Zajko Ju. N., Lepesko A. S., Skidanov A. N. *Razrabotka sistemy klassifikacii i diagnostiki oftalmologicheskikh zabolevanij na osnove iskusstvennyh neyronnyh setej* (Development of a system for the classification and diagnosis of ophthalmic diseases based on artificial neural networks), *Izvestija Saratovskogo universiteta. Novaja serija. Serija Fizika*, 2008, no. 1, vol. 8, pp. 36–41 (in Russian).
6. D'jakonov D. G. *Analiz dannyh, obuchenie po precedentam, logicheskie igry, sistemy WEKA, RapidMainer i Matlab, Uchebnoe posobie* (Data analysis, case studies, logic games, WEKA, RapidMainer and Matlab systems), Moscow, Izdatel'skij otdel fakul'teta VMK MGU im. M. V. Lomonosova, 2010 (in Russian).
7. Hall Mark, Frank Eibe, Holmes Geoffrey, Pfahringer Bernhard, Reutemann Peter, Witten Ian H. The WEKA data mining software: an update. *SIGKDD Explorations*, 2009, vol. 11, pp. 10–18.
8. Voroncov K. V. *Kurs lekcij po metodam ocenivanija i vybora modelej* (Course of lectures on methods of assessment and choice of models). Available at: <http://www.kdd.org/explorations/issues/11-1-2009-07/p2V11n1.pdf> (in Russian).
9. Dembele D., Kastner P. C-means method for clustering microarray data, *Bioinformatics*, 2003, vol. 19(8), pp. 973–980.
10. Orlov A. I. *Prikladnaja statistika. Uchebnik* (Applied statistics. Textbook), Moscow, Jekzamen, 2004 (in Russian).
11. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*, Springer, 2001.
12. Perlman I. The Electroretinogram: ERG, available at: <http://www.webvision.ERG>.
13. Zueva M., Tsapenko I., Vaskov S. The components of human and rabbit 8-Hz and 12-Hz flicker ERG as a function on intensity, size and position of stimuli, *Abstracts of 42nd ISCEV Symposium* (San Juan), 2004, p. 132.
14. Marmor F., Fulton A. B., Holder G. E., Miyake Y., Brigell M., Bach M. *ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography* (2008 update), *Doc Ophthalmol*, 2009, vol. 118, pp. 69–77.
15. Anisimov D. N., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Zueva M. V., Tsapenko I. V. *Diagnosis of the Current State of Dynamic Objects and Systems with Complex Structures by Fuzzy Logic Using Simulation Models* ISSN 0147_6882, *Scientific and Technical Information Processing*, 2013, vol. 40, no. 6, pp. 365–374.
16. Jenkins G. M., Watts D. G. *Spectral Analysis and Its Applications*. San Francisco, CA, Holden-Day, 1968.
17. Kolosov O. S., Balarev D. A., Pronin A. D., Zueva M. V., Capenko C. V. *Ocenka chastotnyh svojstv dinamicheskogo ob'ekta s ispol'zovaniem impul'snyh testirujushhih signalov* (Evaluation of frequency properties of dynamic objects using pulse testing signals), *Mekhatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 219–226 (in Russian).
18. Sergienko A. B. *Cifrovaja obrabotka signalov: uchebnoe posobie* (Digital signal processing), SPb, BHV-Peterburg, 2013 (in Russian).
19. Oppengejm Je., Rjazancev A. M. *Primenenie cifrovoj obrabotki signalov* (Application of digital signal processing), Moscow, Mir, 1980 (in Russian).

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., zenkev@bmstu.ru,
Хуа Чжу, аспирант, zhuohua1302@gmail.com, Мэйсинь Чжай, аспирант, 982696853@163.com,
Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Один способ получения оценки сглаживания фазового вектора в задаче управления движением строя

Сформулирована и решена задача оценки сглаживания с постоянным запаздыванием для непрерывных линейных динамических систем. Указана необходимость получения оценки сглаживания с постоянным запаздыванием при решении задачи управления движением группы мобильных роботов в строю типа "конвой". Описано разделение задачи оценивания фазового вектора систем на три класса: задачу сглаживания, задачу фильтрации и задачу предсказания. Суть задачи сглаживания состоит в том, что для определения оценки неизвестного вектора состояния систем в каждый момент времени $\tau < t$ требуется учесть весь массив измерительной информации, полученный до момента времени t , тем самым используя в соответствующем алгоритме как "прошлые", так и "будущие" измерения. Указан ряд возможных проблем при использовании алгоритмов сглаживания с постоянным запаздыванием: во-первых, иногда система оказывается неустойчивой; во-вторых, для реализации алгоритма требуется знание фундаментальной матрицы (для линейных систем), что может вызвать определенные трудности. Получен рекуррентный алгоритм сглаживания с постоянным запаздыванием, в том числе алгоритм оценки сглаживания в закрепленной точке с использованием свойств фундаментальной матрицы линейной системы. Подчеркнуто преимущество полученных алгоритмов сглаживания, которое состоит в том, что метод позволяет обойти трудоемкий процесс вычисления фундаментальной матрицы системы. Обсужден и исследован процесс вычисления оценки сглаживания: по поступающим зашумленным измерениям параллельно проводятся процесс фильтрации и процесс сглаживания, таким образом, вычисление оценки сглаживания зависит от значения, полученного в процессе фильтрации. Приведены результаты численного моделирования для нестационарной линейной системы и нелинейных систем, которые показывают, что оценки сглаживания с постоянным запаздыванием быстрее сходятся к истинным значениям, чем оценки фильтрации; и неустойчивость оценки сглаживания при моделировании не появилась; с течением времени ошибки оценки сглаживания меньше, чем ошибки фильтрации.

Ключевые слова: оценки сглаживания, постоянное запаздывание, непрерывная линейная система, управление движением строя типа "конвой"

Введение

Важный шаг к решению задачи управления движением строя типа "конвой" [1] состоит в том, что в текущий момент времени необходимо получить оценки положения роботов в некоторые предшествующие моменты времени. Роботы в строю пронумерованы от R_0 (ведущего робота) до R_N (замыкающего конвой). Стратегия управления для каждого ведомого робота R_i состоит в выполнении следующего соотношения:

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_{i-1}(t - T),$$

где $\mathbf{x}_i(t)$ представляет собой положение робота R_i в текущий момент; $\mathbf{x}_{i-1}(t - T)$ — положение робота R_{i-1} в момент времени $t - T$.

Задачи оценивания фазового вектора разделяются на три класса: сглаживание (интерполяцию), фильтрацию и предсказание (экстраполяцию). Суть задачи сглаживания [2] состоит в том, что для определения оценки неизвестного вектора состояния системы в каждый момент времени $\tau < t$ требуется учесть весь массив измерительной информации, полученный до момента времени t , тем самым используя в соответствующем алгоритме как "прошлые", так и "будущие" измерения.

Использование алгоритмов сглаживания сопряжено с рядом проблем:

1. Иногда система оказывается неустойчивой. В частности, этот эффект для линейных

систем продемонстрирован в работе [3]. Опыт авторов также подтвердил этот эффект.

2. Для реализации алгоритма требуется знание фундаментальной матрицы (для линейных систем), что может вызвать определенные трудности.

В настоящей работе предлагается способ получения оценки сглаживания состояния систем, решающий по крайней мере второй из указанных недостатков.

Постановка задачи

Пусть поведение системы описывается системой линейных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\eta}(t), \quad (1)$$

а измерения состояния системы описываются уравнением

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \xi(t), \quad (2)$$

где $\mathbf{A}(t)$ — матрица системы; $\mathbf{H}(t)$ — матрица наблюдений; $\boldsymbol{\eta}(t)$ и $\xi(t)$ — гауссовы белые шумы со следующими характеристиками:

$$E\boldsymbol{\eta}(t) = E\xi(t) = E(\xi(t)\boldsymbol{\eta}^T(t)) = 0;$$

$$E(\boldsymbol{\eta}(t)\boldsymbol{\eta}^T(t')) = \mathbf{Q}(t)\delta(t - t');$$

$$E(\xi(t)\xi^T(t')) = \mathbf{R}(t)\delta(t - t'),$$

где E — математическое ожидание; $\mathbf{Q}(t)$, $\mathbf{R}(t)$ — матрица ковариации шумов; t' — момент времени.

Задача состоит в получении оценки $\hat{\mathbf{x}}(\tau|t)$, $\tau = t - T$, $T = \text{const} > 0$. Это означает, что в каждый момент времени необходимо знать, где была система заданный временной интервал T назад. Как будет показано ниже, алгоритм получения оценки $\hat{\mathbf{x}}(\tau|t)$ включает в себя в качестве составных частей алгоритмы фильтрации и сглаживания в закреплённой точке.

Алгоритм сглаживания в закреплённой точке

Оценка сглаживания в закреплённой точке $\hat{\mathbf{x}}(t_0|t)$, т. е. наилучшая оценка вектора состояния системы на момент время $t = t_0$, имеет вид [4]

$$\hat{\mathbf{x}}(t_0|t) = \Phi(t_0, t)\hat{\mathbf{x}}(t), \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{x}}(t_0)$ — оценка, полученная в результате применения метода теории рекуррентной фильтрации Калмана; $\Phi(t_0, t)$ — фундаментальная матрица системы (1). Как говорилось в работе [5], использование уравнения (3) сопряжено с трудностями, возникающими при нахождении фундаментальной матрицы. Далее предложен метод нахождения оценки сглаживания, позволяющий обойти процедуру поиска $\Phi(t_0, t)$.

Приведем некоторые свойства фундаментальной матрицы, которые понадобятся в дальнейшем:

$$\frac{\partial \Phi(t_1, t_2)}{\partial t_1} = \mathbf{A}(t_1)\Phi(t_1, t_2); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi(t_1, t_2)}{\partial t_2} = -\Phi(t_1, t_2)\mathbf{A}(t_2), \quad (5)$$

здесь t_1, t_2 — моменты времени.

Дифференцируя соотношение (3) по времени t , получим

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t_0|t) = \dot{\Phi}(t_0, t)\hat{\mathbf{x}}(t) + \Phi(t_0, t)\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t). \quad (6)$$

Подставляя в соотношение (6) найденное с использованием свойства (5) выражение $\dot{\Phi}(t_0, t) = -\Phi(t_0, t)\mathbf{A}(t)$, а также известное выражение для оценки фильтрации $\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t)$, после несложных преобразований получим

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t_0|t) = \Phi(t_0, t)\mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}(t)\hat{\mathbf{x}}(t)), \quad (7)$$

где $\mathbf{P}(t)$ — матрица ковариации ошибки оценки фильтрации.

Введем матрицу $\mathbf{L}'(t)$, связанную с матрицей $\mathbf{P}(t)$, следующим образом:

$$\mathbf{L}'(t) = \Phi(t_0, t)\mathbf{P}(t). \quad (8)$$

Дифференцируя соотношение (8) по времени t , с учетом известного уравнения Риккати для $\dot{\mathbf{P}}(t)$ после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{L}}'(t) = & \mathbf{L}'(t)\mathbf{A}^T(t) - \\ & - \mathbf{L}'(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{L}'(t)\mathbf{P}^{-1}(t)\mathbf{Q}. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, в состав выражения для оценки $\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t_0|t)$ не входит фундаментальная матрица $\Phi(t_0, t)$, а кроме того, оценки возможно

осуществлять в реальном времени. Начальные условия для интегрирования системы (7) и (9) совпадают с условиями рекуррентной фильтрации, т. е. $\hat{\mathbf{x}}(t_0|t_0) = \hat{\mathbf{x}}(t_0)$, $\mathbf{L}'(t_0) = \Phi(t_0, t_0)\mathbf{P}(t_0) = \mathbf{P}(t_0)$.

Алгоритм сглаживания с постоянным запаздыванием

Аналогично, оценка сглаживания с постоянным запаздыванием $\hat{\mathbf{x}}(\tau|t)$, т. е. наилучшая оценка вектора состояния системы на момент время $\tau = t - T$ имеет вид

$$\hat{\mathbf{x}}(\tau|t) = \Phi(\tau, t)\hat{\mathbf{x}}(t). \quad (10)$$

Дифференцируя соотношение (10) по времени t , получим

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(\tau|t) = \dot{\Phi}(\tau|t)\hat{\mathbf{x}}(t) + \Phi(\tau|t)\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t). \quad (11)$$

В отличие от $\Phi(t_0, t)$ первый аргумент $\Phi(\tau, t)$ тоже зависит от времени t , таким образом, ее полная производная имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}(\tau, t) &= \frac{\partial \Phi(\tau, t)}{\partial \tau} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\partial \Phi(\tau, t)}{\partial t} = \\ &= \mathbf{A}(\tau)\Phi(\tau, t) - \Phi(\tau, t)\mathbf{A}(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя в соотношение (11) найденное выражение для полной производной фундаментальной матрицы, а также известное вы-

ражение для оценки фильтрации $\hat{\mathbf{x}}(t)$, после несложных преобразований получим оценки сглаживания с постоянным запаздыванием:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(\tau|t) &= \mathbf{A}(\tau)\hat{\mathbf{x}}(\tau|t) + \\ &+ \mathbf{L}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}(t)\hat{\mathbf{x}}(t)). \end{aligned} \quad (13)$$

Заметим, что матрица $\mathbf{L}(t) = \Phi(\tau, t)\mathbf{P}(t)$ не является матрицей ковариации ошибки сглаживания. Дифференцируя ее по времени t , с учетом известного уравнения Риккати для $\dot{\mathbf{P}}(t)$ после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{L}}(t) &= \mathbf{A}(\tau)\mathbf{L}(t) + \mathbf{L}(t)\mathbf{A}^T(t) - \\ &- \mathbf{L}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{L}(t)\mathbf{P}^{-1}(t)\mathbf{Q}. \end{aligned} \quad (14)$$

При интегрировании уравнений (13) и (14) необходимо определить значение $\hat{\mathbf{x}}(\tau|t)$ и $\mathbf{L}(t)$ при $t \leq t_0 + T$. Обсудим это в следующей части.

Процесс вычисления оценки сглаживания с постоянным запаздыванием

На рис. 1 показана структурная схема вычисления оценки сглаживания. Как видно, по поступающим зашумленным измерениям параллельно проводятся процессы фильтрации и сглаживания, и вычисление оценки сглаживания зависит от значений, полученных в процессе фильтрации. Коэффициенты филь-

трации $\mathbf{K}_1(t)$ и коэффициенты сглаживания $\mathbf{K}_2(t)$, $\mathbf{K}_3(t)$ в схеме имеют вид

$$\mathbf{K}_1(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1};$$

$$\mathbf{K}_2(t) = \mathbf{L}'(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1};$$

$$\mathbf{K}_3(t) = \mathbf{L}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1},$$

где $\mathbf{P}(t)$ получаются решением уравнения Риккати; $\mathbf{L}'(t)$, $\mathbf{L}(t)$ получаются решением уравнений (9) и (14) соответственно.

Заметим, что до момента времени $t = t_0 + T$ в процессе сглаживания вычисляется $\hat{\mathbf{x}}(\tau|t) = \hat{\mathbf{x}}(t_0|t)$ и $\mathbf{L}(t) = \mathbf{L}'(t)$.

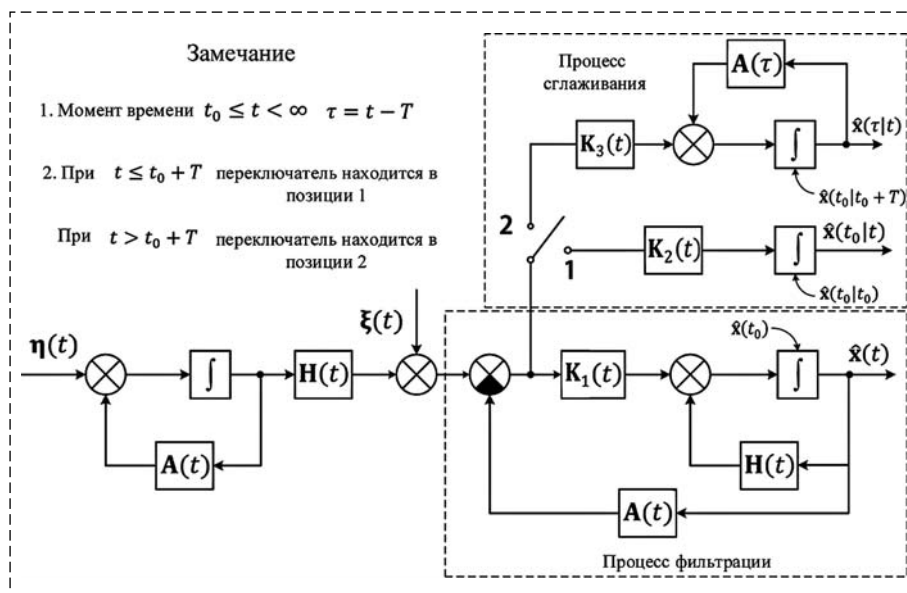


Рис. 1. Структурная схема вычисления оценки сглаживания с постоянным запаздыванием для линейной непрерывной системы

▲ Линейная нестационарная система

Рассмотрим линеаризованное уравнение движения математического маятника в среде с вязкостью, изменяющейся по гармоническому закону (пример в работе [4]):

$$\ddot{\varphi} + \dot{\varphi} \sin(0,08t) + \varphi = 0.$$

Матрица системы имеет вид

$$\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -\sin(0,08t) \end{pmatrix}; \mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) \end{pmatrix}.$$

Измеряемой координатой считаем только угол отклонения маятника:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \xi(t); \mathbf{H}(t) = (1 \ 0).$$

При моделировании время запаздывания $T = 2$ с, начальные условия $\mathbf{x}(t_0) = (1, 1)^T$, $\hat{\mathbf{x}}(t_0) = (0, 0)^T$, полученные результаты показаны на рис. 2 и рис. 3, 4 (см. вторую сторону обложки). Как видно, оценки сглаживания с постоянным запаздыванием быстрее сходятся к истинным значениям, чем оценки фильтрации, кроме того, неустойчивость оценки сглаживания при моделировании не появилась. С течением времени ошибки оценки сглаживания становятся меньше, чем ошибки фильтрации.

▲ Нелинейная система

Теперь рассмотрим применение предложенного метода в задаче управления движением строя типа "конвой" [1], одной подзадачей которого является задача локализации. В этом случае мы используем сами роботы в виде подвиж-

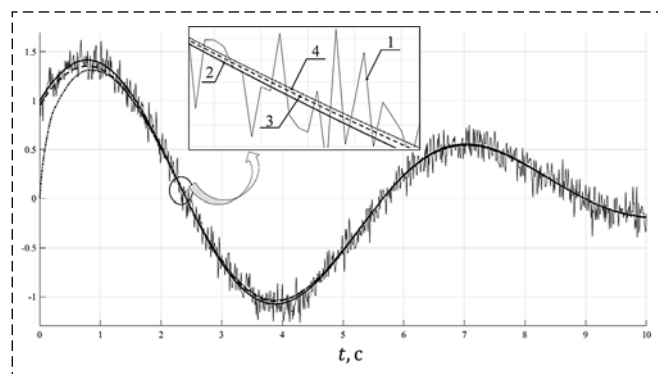


Рис. 2. Фазовая координата $\varphi(t)$:

1 — измеренное значение координаты $\varphi(t)$; 2 — истинное значение $\varphi(t)$; 3 — оценка сглаживания; 4 — оценка фильтрации

ных указателей для осуществления локализации роботов, и требуется выполнение трех условий:

а) знание глобального положения ведущего робота;

б) знание положения ведущего робота относительно ведомого;

в) возможность передавать информацию о положении ведомому роботу (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

Используя эту информацию, каждый робот определяет собственное положение в абсолютной системе координат. В процессе решения задачи управления движением каждого робота строя возникает проблема определения собственного положения каждого робота R_{i-1} относительно R_i . В лабораторных условиях эта проблема может быть решена путем установки систем зрения, определяющих декартовы координаты всех членов конвоя, что является невозможным при движении роботов в открытом пространстве.

Рассмотрим решение следующей задачи: по измерениям, проводимым лазерным сканером, требуется определить положение робота R_{i-1} относительно R_i ($x_{i-1}^i, y_{i-1}^i, \theta_{i-1}^i$) в системе координат робота R_i (рис. 5, см. вторую сторону обложки). Для упрощения записи далее ($x_{i-1}^i, y_{i-1}^i, \theta_{i-1}^i$) будем обозначать через (x, y, θ_r) .

Уравнение движения робота R_{i-1} в связанной системе координат $O_r X_i Y_i$ робота R_i имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega^i y - v^i + v^{i-1} \cos \theta_r; \\ \dot{y} = -\omega^i x + v^{i-1} \sin \theta_r; \\ \dot{\theta}_r = \omega^{i-1} - \omega^i. \end{cases}$$

Очевидно, это уравнение описывает движение нелинейной системы

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)),$$

где $\mathbf{x}(t) = (x, y, \theta_r)^T$, $\mathbf{u}(t) = (\omega^{i-1}, v^{i-1}, \omega^i, v^i)^T$.

Уравнение измерений имеют вид

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \xi(t); \mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В соответствии с предложенным в работе [1] законом управления алгоритм сглаживания с постоянным запаздыванием может быть использован в этом случае, т. е. в каждый момент времени по измерениям $\mathbf{z}(t)$ мы получаем оценки $\hat{\mathbf{x}}(t-T) = (\hat{x}(t-T), \hat{y}(t-T), \hat{\theta}_r(t-T))^T$.

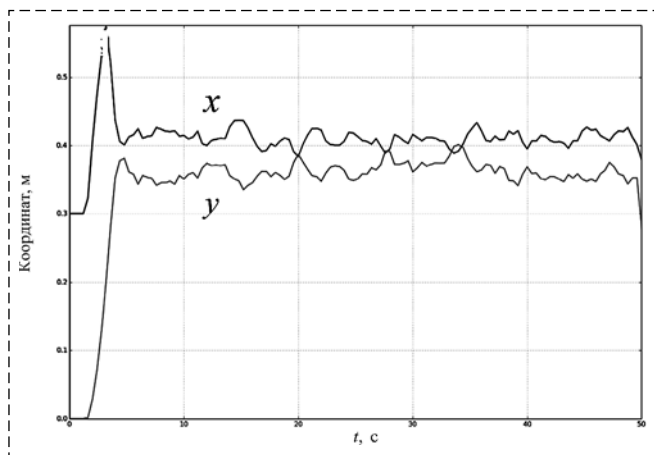


Рис. 7. Координаты робота

Линеаризованное вдоль оценки уравнение движения имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t),$$

где

$$\mathbf{A}(t) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{u}(t)} = \begin{pmatrix} 0 & \omega^i(t) & -v^{i-1}(t)\sin\hat{\theta}_r \\ -\omega^i(t) & 0 & v^{i-1}(t)\cos\hat{\theta}_r \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Эксперимент проводился с участием двух роботов в среде ROS (рис. 6, см. вторую сторону обложки). Робот R_{i-1} совершал движение

со скоростью $v^{i-1} = 0,2$ м/с; $\omega^{i-1} = 0,5$ рад/с, а робот R_i повторял траекторию робота R_{i-1} с запаздыванием $T = 2$ с. Соответствующие графики показаны на рис. 7. Видео движения двух роботов и коды для осуществления алгоритма сглаживания в среде ROS представлены в [6].

Заключение

В работе предложен рекуррентный алгоритм вычисления оценки сглаживания с постоянным запаздыванием. Преимущество этого способа заключается в том, что в процессе вычислений не используется фундаментальная матрица.

Список литературы

1. **Зенкевич С. Л., Чжу Хуа** Управление движением группы роботов в строю типа "конвой" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 1. С. 30–34.
2. **Александров В. В.** и др. Оптимизация динамики управляемых систем. М.: Изд-во МГУ, 2000. 304 с.
3. **Meditch J. S.** On optimal linear smoothing theory // Information and control. 1967. № 10. Р. 598–615.
4. **Абгарян К. А.** Матричное исчисление с приложениями в теории динамических систем. М.: Физматлит, 1994. 544 с.
5. **Зенкевич С. Л., Заединов Р. В.** Об оценке предсказания фазового вектора непрерывных линейных динамических систем // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2002. № 3. С. 72–80.
6. URL: <https://www.dropbox.com/sh/irekgv6ch2fhj0s/AADkiUXSpvoBv6sJJ4Zk3C-Ha?dl=0>

One Way to Obtain the Smoothed Estimate of Phase Vector in the Task of Motion Control of Convoy Robots

S. L. Zenkevich, zenkev@bmstu.ru, **Hua Zhu**, zhuhua1302@gmail.com, **Meixin Zhai**, 982696853@163.com, Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Zhu Hua**, Ph. D., Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: zhuhua1302@gmail.com

Accepted on February 05, 2018

In this paper, we formulated and solved the problem of fixed-lag smoothing estimation for continuous linear dynamical systems. The problems of other fixed-lag smoothing algorithm for continuous linear dynamical systems are indicated. Firstly, sometimes the fixed-lag smoothing algorithm is not stable. Secondly, the knowledge of state transition matrix is needed to implement algorithm. It is different to get it, especially for time-vary system. An algorithm is developed for generating the optimal smoothed estimate $\hat{\mathbf{x}}(t-T|t)$ of the state $\mathbf{x}(t)$ of a continuous linear system, where t is the most recent measurement and T is a positive real constant. The recurrent algorithm is obtained using the properties of state transition matrix $\Phi(t_1, t_2)$ of a linear dynamical system. The developed method makes it possible to bypass the time-consuming procedure of finding state-transition matrix. The process of computing the fixed-lag smoothed estimate is discussed in terms of the algorithm's dependence on the solutions of the filtering and fixed-point smoothing problems. Therefore, the calculation of the estimation of fixed-lag smoothing depends on the value obtained during the filtering process. We give the simulation result of fixed-lag smoothing algorithms for a nonstationary linear system and compared it with the simulation result of filtering algorithms. It is showed that the estimation errors of fixed-lag smoothing are less than the estimation errors of filtering. We also used the fixed-lag smoothing algorithms to improve the localization accuracy of robots in the task of motion control of convoy robots. A node named fix_lag_smoothing is written using C++ in ROS.

Keywords: smoothed estimate, fixed-lag smoothing, continuous linear system, motion control of convoy robots

For citation:

Zenkevich S. L., Zhu Hua, Zhai Meixin. One way to obtain the smoothed estimate of phase vector in the task of motion control of convoy robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 458—463.

DOI: 10.17587/mau.19.458-463

References

1. **Zenkevich S. L., Zhu Hua.** *Upravlenie dvizheniem gruppy robotov v stroju tipa "konvoj"* (Control of a group of mobile robots moving in the convoy type formation), *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*, 2017, no. 1, pp. 30—34 (in Russian).

2. **Aleksandrov V. V. i dr.** *Optimizacija dinamiki upravljajemyh sistem* (Optimization of the dynamics of control systems), Moscow, Publishing house of MSU, 2000, 304 p. (in Russian).

3. **Meditch J. S.** On optimal linear smoothing theory, *Information and Control*, 1967, no. 10, pp. 598—615.

4. **Abgarjan K. A.** *Matrichnoe ischislenie s prilozhenijami v teorii dinamicheskikh sistem* (Matrix calculus with applications in the theory of dynamical systems), Moscow, Fizmatlit, 1994, 544 p. (in Russian).

5. **Zenkevich S. L., Zaedinov R. V.** *Ob ocenke predskazanija fazovogo vektora nepreryvnykh linejnykh dinamicheskikh sistem* (On the prediction estimate of phase vector for continuous linear dynamical systems), *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. "priborostroenie"*, 2002, no. 3, pp. 72—80 (in Russian).

6. **Available** at: <https://www.dropbox.com/sh/irekgv6ch2fhj0s/AADkiUXSpvoBv6sJJ4Zk3C-Ha?dl=0>



2—4 октября 2018 г. в Санкт-Петербурге
в ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"
состоится

11-я Российская мультиконференция ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (РМКПУ—2018)



Мультиконференция включает в себя три конференции, объединенные общей идеей:

- XXXI конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова (<http://www.elektropribor.spb.ru/ostr2018>)
- Конференция «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2018) (<http://www.elektropribor.spb.ru/itu2018>)
- Конференция «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2018) (<http://www.elektropribor.spb.ru/umas2018>)

Конференция «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ И АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УМАС—2018) НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

- Использование достижений современной теории управления в задачах управления авиационными, ракетно-космическими и морскими подвижными объектами и комплексами
- Человек-оператор в морских и аэрокосмических системах
- Системы ориентации и стабилизации авиационных и ракетно-космических объектов
- Управление беспилотными аппаратами в различных средах
- Бортовые компьютерные системы и сети для управления космическими аппаратами и морскими подвижными объектами.
- Бортовое и наземное радиоэлектронное обеспечение управления морскими и аэрокосмическими системами и перспективы его совершенствования
- Интеллектуальное навигационное обеспечение управления морскими и аэрокосмическими системами и системы радиосвязи
- Геоинформационное обеспечение интеллектуального управления морскими и аэрокосмическими системами
- Поддержка принятия решений в кризисных ситуациях на базе аэрокосмических систем мониторинга и управления
- Интегрированная обработка данных и информации в аэрокосмических и морских системах
- Надежность, живучесть и эффективность функционирования систем управления морскими и аэрокосмическими объектами
- Обучающие программы и тренажеры в морских и аэрокосмических системах
- Управление морскими и аэрокосмическими роботами
- Управление динамикой и физическими полями морских подвижных объектов
- Мультиагентные и сетевые системы управления авиационными, ракетно-космическими и морскими подвижными объектами и комплексами
- Управление эксплуатацией авиационных, ракетно-космических и морских подвижных объектов и комплексов

Подробную информацию о конференции см. сайте:
<http://www.elektropribor.spb.ru/umas2018>

Р. Т. Галемов, аспирант, galemovruslan@gmail.com,
Г. Б. Масальский, канд. техн. наук, проф., gmasalsky@sfu-kras.ru,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Комбинированный поисковой метод решения обратной задачи кинематики многозвенного манипулятора

Рассматривается решение обратной задачи кинематики многозвенного манипулятора. Данная задача является многоэкстремальной с позиционными и функциональными ограничениями. Предложено решение комбинированным поисковым методом на основе генетического алгоритма и симплексного поиска. Генетический алгоритм способен найти глобальный оптимум многоэкстремальной функции, но поскольку данный метод не имеет направления поиска, то даже при попадании в область экстремума генетическому алгоритму может потребоваться большое число шагов для его достижения. Симплексный поиск способен быстро достичь экстремума, но шанс, что найден глобальный экстремум, меньше, чем у генетического алгоритма. Комбинированный алгоритм использует сильные стороны одного алгоритма, чтобы нейтрализовать слабые стороны второго. Выбор алгоритмов обусловлен отсутствием необходимости рассчитывать производные целевой функции и ограничений, а также простотой реализации в программном коде и возможностью применения ограничений поиска. Комбинированный алгоритм работает путем непрерывного чередования шагов генетического алгоритма и полных процедур симплексного поиска. На каждом шаге генетического алгоритма несколько лучших особей из популяции становятся центрами симплексов, из которых начинается симплексный поиск. Результаты симплексного поиска улучшают популяцию генетического алгоритма. Таким образом, глобальный оптимум может быть найден за несколько шагов комбинированного поиска. Проведены испытания на манипуляторах с избыточными и не избыточными конструкциями. Представлено сравнение решений предложенным методом с генетическим алгоритмом и градиентным методом. По показателям времени поиска, числу вызовов целевой функции и точности позиционирования рабочего органа манипулятора предложенный метод предпочтительнее обычного генетического алгоритма.

Ключевые слова: многозвенный манипулятор, обратная задача кинематики, генетический алгоритм, симплексный поиск, комбинированный поисковой метод

Решение обратной задачи кинематики — это важный этап в процессе построения траектории движения манипулятора. Существует несколько подходов к решению. Так, алгебраический подход подразумевает вычисление углов в сочленениях с помощью решения системы нелинейных уравнений [1–3]. При этом подходе число уравнений равно числу степеней свободы манипулятора. Недостатком этого подхода является сложность, а иногда и невозможность получения системы уравнений при числе степеней свободы манипулятора больше трех.

Итеративный подход включает семейство методов пошагового решения, которое сводится к постепенному уменьшению ошибки по положению и ориентации рабочего органа. Текущее положение и ориентация рабочего органа находятся решением прямой задачи кинематики. Наиболее часто для решения обратной задачи кинематики используются метод обратного якобиана, градиентные методы, координатный спуск, генетический алгоритм и т. д. Метод обратного якобиана [4] заключается в приведении изменений обобщенных координат

манипулятора в изменения в координатах рабочего органа в декартовом пространстве. Для обратного якобиана недостатком является инвертирование матрицы Якоби: с ростом числа степеней свободы ее размер увеличивается, и эта операция может быть затратной по времени. Кроме того, при определенном положении манипулятора якобиан может вырождаться. Проблему вырождения решает использование псевдообратного якобиана [5]. Этот метод использует псевдообратный якобиан, который определен для любой матрицы Якоби, даже неквадратных и с неполным рангом по строкам. Однако при использовании такого подхода теряется точность, и при приближении заданного положения рабочего органа к границе рабочей области могут появиться большие изменения в обобщенных координатах для небольшого перемещения рабочего органа [6].

Координатный спуск [7] лишен проблем метода обратного якобиана и для манипуляторов с небольшим числом степеней свободы работает очень быстро, но с ростом степеней подвижности время поиска значительно увеличи-

вается, кроме того, время поиска зависит от расстояния, на которое перемещается рабочий орган. Общей проблемой вышеописанных методов является то, что они находят всего одно решение, которое не всегда оптимально в силу многоэкстремальности задачи.

Градиентные методы [8, 9] способны найти решение с учетом функциональных и позиционных ограничений. Однако для их работы требуется градиент целевой функции, который для манипулятора с числом степеней больше трех затруднительно вывести аналитически. Вместо градиента можно использовать его аппроксимацию, что может привести к увеличению числа вызовов целевой функции.

Генетический алгоритм (ГА) способен найти оптимальное решение, но ему потребуется большая популяция, что сильно повлияет на скорость движения к цели. Среди достоинств метода можно отметить простоту исполнения самого алгоритма и простоту введения ограничений в задачу поиска и низкую вычислительную сложность. ГА уже долгое время используются для решения обратной задачи кинематики манипулятора. В первой работе по данной теме [10] было показано, что можно получить решение с минимизацией отклонения обобщенных координат от начальной конфигурации. Для увеличения точности решения использовался метод ниш [11, 12], позволяющий находить множество решений и проводить их сравнение для нахождения оптимального результата. Кодирование хромосом алгоритма может быть как бинарное [10, 13], так и вещественное [14, 15]. ГА используются для решения обратной задачи избыточных [16] и избыточных [17] манипуляторов. Также возможно уменьшение времени поиска за счет распараллеливания вычислений на *GPU* [18].

Для уменьшения времени поиска и повышения точности ГА его используют в комбинации с симплексным поиском. В работе [15] представлен гибрид ГА с алгоритмом Нелдера — Мида, в котором оценивается положение оптимума и лучшие вершины ГА образуют симплекс, который завершает поиск оптимума. В работах [19, 20] на каждом шаге ГА с популяцией проводятся операции симплексного поиска: отражение, сжатие, растяжение. В работе [21] представлена комбинация, в которой каждая хромосома ГА является набором

вершин, образующим симплекс. Комбинированные алгоритмы чаще находят глобальный минимум функции за меньшее время и имеют меньшее число вызовов целевой функции [15, 19—21].

Целью данной статьи является разработка и применение комбинированного поискового алгоритма для решения обратной задачи кинематики (ОЗК) многозвенного манипулятора. Поскольку ОЗК может иметь множество локальных оптимумов, то требуется алгоритм, способный найти глобальный оптимум. Обычный ГА решает ОЗК, но в комбинации с симплексным поиском решение будет найдено значительно быстрее.

Прямая задача кинематики

Решение прямой задачи кинематики (ПЗК) для манипулятора с известной структурой есть расчет координат рабочего органа (РО) относительно координат основания манипулятора в рабочем пространстве при известных обобщенных координатах. В общем виде эта задача выглядит следующим образом:

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{q}), \quad (1)$$

где $\mathbf{q}$ — вектор $n \times 1$ обобщенных координат манипулятора, $\mathbf{x} = [\mathbf{r}^T \ \mathbf{p}^T]^T$ — комбинированный вектор размерности m , отображающий степень свободы РО манипулятора; $\mathbf{r}$ — вектор положения манипулятора размерности $m_r \times 1$, $\mathbf{p}$ — вектор ориентации рабочего органа размерности $m_p \times 1$, m_r и m_p — степени свободы РО на перемещение и вращение соответственно. Векторы $\mathbf{r}$ и $\mathbf{p}$ представлены на рис. 1. Величина $m = m_r + m_p$ зависит от конструкции манипулятора. Для планарного манипулятора $m = 3$, так как РО может двигаться вдоль двух осей и вращаться вокруг одной оси. Макси-

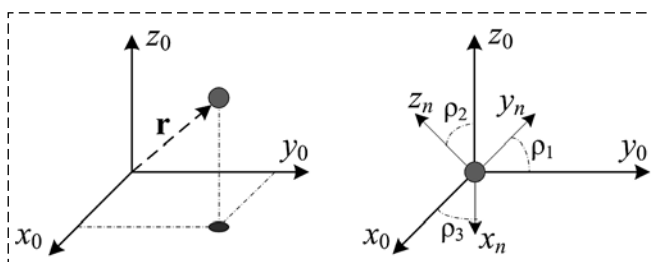


Рис. 1. Рабочее пространство манипулятора

Таблица 1

Параметры Денавита — Хартенберга

Параметр	Значение
q_i	Угол между x_{i-1} и x_i вокруг оси z_{i-1}
α_i	Угол между z_{i-1} и z_i вокруг оси x_i
a_i	Расстояние между сочленением z_{i-1} и z_i вдоль оси x
d_i	Расстояние от основания $i-1$ системы координат до оси x_i вдоль z_{i-1}
σ_i	Тип сочленения: 1 — призматическое; 0 — вращательное

мальное значение $m = 6$, тогда РО может перемещаться и вращаться по всем трем осям декартовой системы координат.

Решение прямой задачи кинематики манипулятора начинается с присвоения каждому сочленению локальных систем координат, начиная с основания манипулятора. Каждая локальная система координат описывается положением и ориентацией текущего сочленения по отношению к предыдущему. Положение и ориентация описываются параметрами Денавита — Хартенберга [22]. Список и значения параметров представлены в табл. 1.

Эти параметры используются для формирования матриц трансформации. Положение и ориентация системы координат i -го сочленения по отношению к $(i-1)$ -му сочленению описывается матрицей трансформации:

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} c(q_i) & -c(\alpha_i)s(q_i) & s(\alpha_i)s(q_i) & a_i c(q_i) \\ s(q_i) & c(\alpha_i)c(q_i) & -s(\alpha_i)c(q_i) & a_i s(q_i) \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $c(q_i) = \cos q_i$, $s(q_i) = \sin q_i$.

Решение прямой задачи кинематики находится из матрицы трансформации n -го сочленения по отношению к основанию манипулятора:

$$A_0^n = A_0^1 A_1^2 \dots A_{n-1}^n. \quad (3)$$

Вектор $\mathbf{x} = [\mathbf{r}^T \mathbf{p}^T]^T$ извлекается из A_0^n .

Обратная задача кинематики

ОЗК манипулятора — это поиск таких обобщенных координат $\mathbf{q}$, при которых текущее по-

ложение и ориентация РО ($\mathbf{x}$) равны заданным ($\mathbf{x}_d$). ОЗК выводится из уравнения (1) при условии $\mathbf{x} = \mathbf{x}_d$:

$$\mathbf{q} = f^{-1}(\mathbf{x}_d). \quad (4)$$

Решение ОЗК напрямую связано с основной целью управления манипулятором — расположением РО в определенном положении и ориентацией. Трудность решения ОЗК заключается в том, что $f^{-1}(\cdot)$ сложно аналитически выразить из $f(\cdot)$. Также $f(\cdot)$ зависит от конструкции манипулятора, поэтому аналитическое решение $f^{-1}(\cdot)$, найденное для одного, будет неадекватным для другого. Кроме того, для манипуляторов с числом степеней свободы $n > 1$, для точек a и b при $\mathbf{q}_a \neq \mathbf{q}_b$ задача (1) может давать $f(\mathbf{q}_a) = f(\mathbf{q}_b)$. Поэтому у уравнения (4) может существовать более одного решения. При этом эти решения могут сильно отличаться друг от друга, и для нахождения лучшего решения необходимо ввести дополнительный критерий, а именно энергию, затраченную на перемещение.

Рассмотрим решение (4) в виде задачи нелинейного программирования:

$$Q(\mathbf{q}) \rightarrow \min_{\mathbf{q} \in V}, \quad (5)$$

где $V = \{\mathbf{q}; \mathbf{q} \in E^n, g(\mathbf{q}) = 0, \mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}\}$.

Целевая функция (5) отображает энергию, затраченную на перемещение

$$Q(\mathbf{q}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - q_{0,i})^2}, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}_d = [\mathbf{r}_d^T \mathbf{p}_d^T]^T$ — вектор требуемых координат РО; $\mathbf{q}_0$ — вектор обобщенных координат в начальный момент времени.

Функциональные ограничения обязывают вести поиск только среди конфигураций с минимальной ошибкой по положению и ориентации:

$$g(\mathbf{q}) = \omega \sum_{i=1}^{m_r} \left[\sqrt{(r_{d,i} - r_i(\mathbf{q}))^2} \right] + (1 - \omega) \sum_{j=1}^{m_p} \left[\sqrt{(\rho_{d,j} - \rho_j(\mathbf{q}))^2} \right] = 0, \quad (7)$$

где $0 \leq \omega \leq 1$ определяет важность точности положения при поиске.

Здесь позиционные ограничения отображают физические ограничения на перемещения сочленений:

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max}. \quad (8)$$

Комбинированный поисковой метод

Генетический алгоритм — итеративный эвристический алгоритм поиска, использующийся для решения многомерных задач оптимизации значений целевой функции путем случайного подбора, комбинирования и вариации исходных параметров. ГА содержит "популяцию" точек в пространстве поиска, называемых "особи". На каждом шаге поиска создается новая популяция. С каждой новой популяцией особи будут находиться ближе к оптимуму. Чтобы создать новую популяцию на основе предыдущей, ГА выполняет следующие шаги: а) вычисление целевой функции каждой особи популяции; б) выбор особей на основе значения их целевой функции; в) рекомбинация существующих особей генетическими операциями: скрещивание и мутация. ГА работает независимо над несколькими потенциальными решениями, а не над одним, что позволяет находить глобальный оптимум. Также поиску глобального оптимума содействует наличие случайностей в операциях выбора и рекомбинации.

Пусть имеется задача (5). Для поиска в n -мерном пространстве одна особь будет иметь n генов и представлять одну конфигурацию манипулятора. Значение целевой функции особи называется фитнесом или приспособленностью. Алгоритм состоит из следующих этапов:

1) создается начальная популяция P_0 объемом $pSize$ в разрешенной области поиска таким образом, что особи равномерно заполняют пространство поиска;

2) увеличивается счетчик популяций $i = i + 1$ и создается новая популяция P_i . Среди особей старой популяции выбирается самая приспособленная q_i , она сохраняется неизменной и переносится в новую популяцию $q_i \in P_i$. Остаток новой популяции заполняется потомками;

3) выбор родителей происходит по турнирной схеме. Из P_{i-1} случайно выбирается часть особей, среди которой находится наиболее приспособленная, она становится одним из

родителей. Второй родитель выбирается таким же способом;

4) скрещивание является одноточечным, т. е. в хромосоме потомка существует одна точка, по одну сторону от которой находятся гены родителя 1, а по другую — гены родителя 2. Вероятность получения генов родителя 1 равна p_c , вероятность получения генов родителя 2 соответственно равна $(1 - p_c)$;

5) на стадии мутации получившийся с прошлого шага потомок может получить случайное изменение в генах с вероятностью p_m . На практике для каждого гена происходит сравнение случайного числа из диапазона $[0,1]$ с p_m , и если случайное число меньше p_m , то текущий ген получит случайное число из допустимого диапазона;

6) новая популяция заменяет старую, и для всех ее особей считается функция фитнеса;

7) условие останова: достижение максимального числа популяций $i = N_{ga}$, или самая приспособленная особь не меняется определенное число поколений $q_{l,i} = q_{l,i-1} = \dots = q_{l,i-k_s}$, или целевая функция находится в определенном диапазоне значений. Если выполнены условия останова, то переход к п. 8, в противном случае переход к п. 2;

8) вывод самой приспособленной особи.

Алгоритм Нелдера — Мида (симплексный поиск (СП)) — это локальный алгоритм прямого поиска нулевого порядка. "Симплекс" — это геометрическая фигура в n -мерном пространстве, состоящая из $(n + 1)$ вершин. В процессе работы алгоритм использует простые геометрические трансформации над симплексом (отражение, сжатие, растяжение). Для выбора подходящей трансформации используется значение целевой функции в каждой вершине. После каждой трансформации текущая худшая вершина заменяется на лучшую. Таким образом, симплекс движется в сторону оптимума. При любом значении n алгоритм на каждом шагу требует не более трех вычислений целевой функции (на отражение, сжатие и растяжение), что делает СП быстрее других алгоритмов, требующих на каждом шагу вычисления целевой функции n раз.

Алгоритм Нелдера — Мида:

1) для пространства поиска размерности n строится симплекс из $n + 1$ вершин. Строится начальный симплекс вокруг заданного центра с заданной длиной ребра;

2) вычисляется целевая функция для всех вершин. Лучшая вершина $\mathbf{q}_l$ имеет значение целевой функции $Q(\mathbf{q}_l) < Q(\mathbf{q}_j)$, худшая вершина $\mathbf{q}_s$ с целевой функцией $Q(\mathbf{q}_j) < Q(\mathbf{q}_s)$ $j = 1 \dots n + 1, j \neq l$;

3) вершина $\mathbf{q}_s$ отражается относительно центра тяжести остальных вершин, отраженная вершина обозначается $\mathbf{q}_r$;

4) проводится сравнение отраженной вершины с остальными. Существуют несколько вариантов изменения симплекса в зависимости от значения целевой функции в $\mathbf{q}_r$:

а) если $Q(\mathbf{q}_r) < Q(\mathbf{q}_l)$, то симплекс растягивается в сторону $\mathbf{q}_r$;

б) если $Q(\mathbf{q}_l) < Q(\mathbf{q}_r) < Q(\mathbf{q}_s)$, то симплекс сохраняет форму на текущем шаге;

с) если $Q(\mathbf{q}_s) < Q(\mathbf{q}_r)$, то происходит сжатие отраженной вершины к центру тяжести оставшихся n вершин;

5) проверка условия останова: если симплекс удовлетворяет условию

$$\sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} (Q(\mathbf{q}_j) - \bar{Q})^2} < \varepsilon \quad (9)$$

при известном ε или число шагов больше N_{sim} , то переход к п. 6. Если не удовлетворяет, переход к п. 3;

б) вывод лучшей вершины.

Здесь $Q(\mathbf{q}_a) < Q(\mathbf{q}_b)$ для точек a и b обозначает, что точка a лучше точки b .

Интенсификация — процесс уменьшения области поиска ГА. Используется для повышения шансов нахождения глобального оптимума, а также увеличения точности поиска в целом. Смысл ее заключается в увеличении концентрации особей ГА в перспективной области (*promising area*) [23]. Перспективная область — область пространства поиска ГА, в которой, вероятнее всего, находится глобальный оптимум. Она считается найденной, если в ней находится лучшая особь популяции и большая часть других особей. В процессе интенсификации происходит уменьшение размера области поиска и объема популяции.

Интенсификация характеризуется параметром сжатия $0 < \gamma_{pa} < 1$, который регулирует, какая доля области поиска и популяции останется после интенсификации.

Оптимизационные алгоритмы можно классифицировать на глобальные и локальные.

Глобальные методы (ГА) способны найти глобальный оптимум на многоэкстремальной функции. Локальные методы (СП) за короткое время находят ближайший оптимум, независимо от того, глобальный он или нет.

Недостатком ГА является большое число шагов и обращений к целевой функции из-за частично случайного характера поиска.

СП быстро сходится к ближайшему оптимуму, но не способен выбраться из локального оптимума.

Для сохранения достоинств и устранения недостатков рассмотренных методов поиска был разработан комбинированный метод поиска. Суть его заключается в том, что на каждом шаге ГА его лучшие особи передаются в algo-

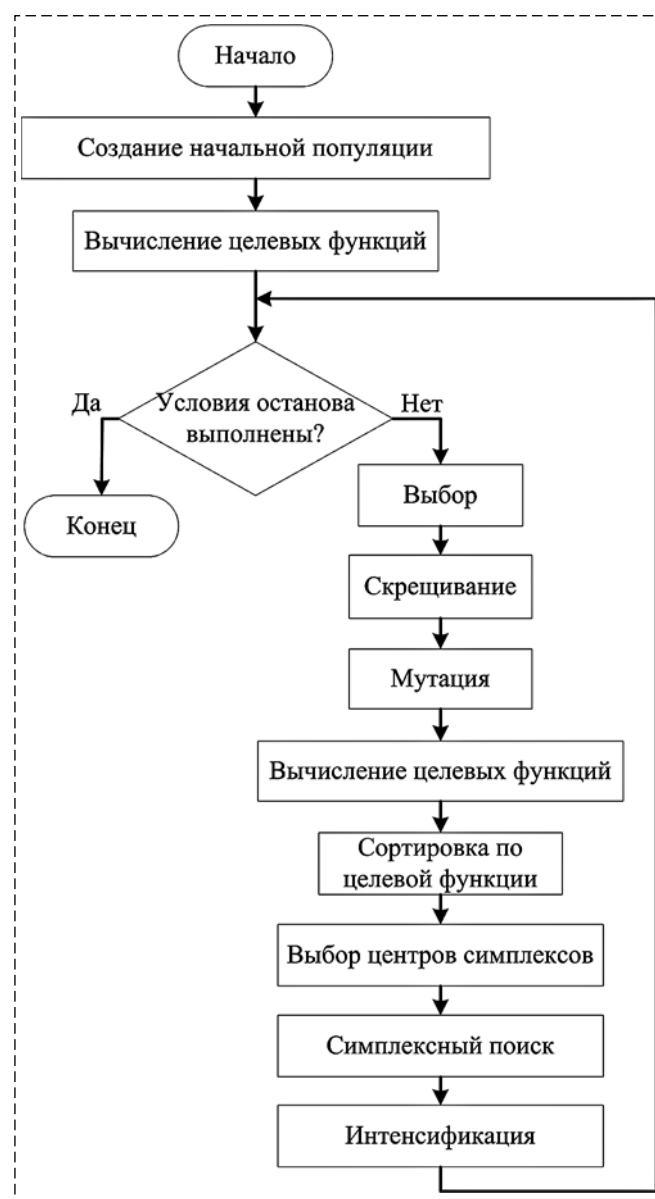


Рис. 2. Алгоритм КПМ

ритм Нелдера — Мида, где вокруг них строятся симплексы и выполняется симплексный поиск. Результаты поиска сравниваются с особями ГА и при необходимости заменяют их. Алгоритм комбинированного поискового метода:

- 1) $i = 0$;
 - 2) инициализация ГА:
 - 2.1) создание начальной популяции P_i ГА объемом $pSize$;
 - 2.2) вычисление целевой функции (5) для особей популяции P_i ;
 - 3) $i = i + 1$.
 - 4) создание популяции P_i :
 - 4.1) выбор родителей;
 - 4.2) скрещивание;
 - 4.3) мутации;
 - 5) вычисление целевой функции у популяции P_i ;
 - 6) симплексный поиск:
 - 6.1) сортируем P_i по значению целевой функции в порядке убывания;
 - 6.2) k_i первых точек из P_i становятся начальными точками для k_i СП;
 - 6.3) k_i новых точек, найденных по завершению СП заменяют k_i первых точек из P_i ;
 - 7) проверка условий интенсификации:
 - 7.1) условия выполнены: интенсификация, переход к п. 2;
 - 8) проверка условий остановки ГА:
 - 8.1) условия выполнены: остановка поиска;
 - 8.2) иначе переход к п. 3;
- Схема алгоритма представлена на рис. 2.

Решение обратной задачи кинематики

Для решения обратной задачи кинематики (4) n -мерного манипулятора необходимо осуществлять поиск углов в сочленениях $\mathbf{q}$ в n -мерном пространстве. Каждая особь популяции представляет собой самостоятельное решение ОЗК. Гены особи кодируются числами с плавающей точкой. Число генов равно n . Структура особи/вершины q показана на рис. 3.

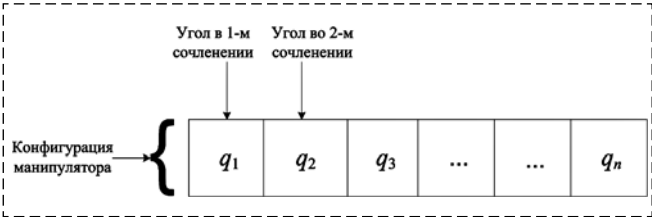


Рис. 3. Структура особи/вершины

Обратная задача кинематики решалась комбинированным поисковым методом (КПМ). Для сравнения использовались ГА и метод внутренней точки (МВТ) как алгоритм, требующий градиент целевой функции и учитывающий функциональные и позиционные ограничения. Для моделирования использовался пакет *MATLAB*, установленный на *PC* с процессором *Intel Pentium P6000 1.87 ГГц*, 3 Гб *DDR3 ОЗУ*.

Параметры КПМ подбирались по результатам экспериментов с условием, что средняя ошибка по положению будет меньше 0,005 м при минимальном объеме вызовов целевой функции. Для сравнения проводился поиск с помощью ГА с параметрами КПМ. Далее экспериментально находились параметры ГА, при которых средняя ошибка по положению была меньше 0,005 м при минимальном объеме вызовов целевой функции.

Трехзвенный неизбыточный манипулятор

Данный манипулятор не является избыточным ($m \geq n$), поэтому ОЗК имеет малое (≈ 2) число решений. Кинематическая схема манипулятора представлена на рис. 4. Параметры Денавита — Хартенберга для манипулятора представлены в табл. 2.

Параметры КПМ: длина хромосомы $n = 3$; размер популяции $pSize = 10$; вероятность

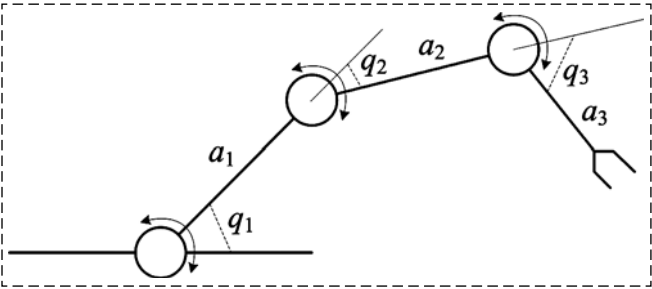


Рис. 4. Кинематика трехзвенного манипулятора

Таблица 2

Параметры трехзвенного манипулятора

Параметр	Звено		
	1	2	3
σ_i	0	0	0
α_i , рад	0	0	0
a_i , м	0,500	0,670	0,200
d_i , м	0	0	0

Таблица 3

Сравнения средних показателей поиска
для трехзвенного планарного манипулятора

Алгоритм	e_r , м	e_p , °	k	t , с
КПМ	0	0,02	1487	3,4
ГА, $N_{ga} = 10$	0,566	28,67	1231	2,9
ГА, $N_{ga} = 100$	0,007	0,24	29 681	67
МВТ	0	0	123	0,9

скрещивания $\rho_c = 0,5$; вероятность мутации $\rho_m = 0,85$; максимальное число популяций $N_{кпм} = 10$; интенсификация после отсутствия улучшения в $k_s = 3$ поколениях; $\gamma_{pa} = 0,75$; $k_l = 3$, максимальное число шагов симплекса $N_{sim} = 50$.

Каждый алгоритм решал восемь задач, распределенных по рабочему пространству. Алгоритм ГА имеет идентичные КПМ параметры: максимальное число популяций и размер популяции $pSize = 10$. Также экспериментально определены параметры ГА, при которых результаты поиска приближаются к КПМ. Эффективность оценивается такими значениями, как ошибка по положению e_r , ошибка ориентации e_p , число вызовов целевой функции k и время выполнения t . Собранные данные представлены в табл. 3.

Несмотря на то, что МВТ имеет наилучшие показатели по таблице, он не смог найти решение четырех из восьми задач. Как показали эксперименты, МВТ не может решить некоторые ОЗК, при которых необходимо повернуть первое сочленение более чем на 180° . Это происходит в ситуациях, когда для достижения цели необходимо совершить движение, которое приведет к увеличению значения функции ограничения. ГА при схожих параметрах имеет несравнимо худшие результаты, и для достижения повышения точности необходимо использовать значение параметра $N_{ga} = 100$, что

замедляет поиск в ≈ 20 раз. Сравнивая эксперименты можно отметить следующее:

- самый быстрый алгоритм: МВТ 0,9 с, однако не гарантировано, что решение будет найдено;
- КПМ по сравнению с МВТ имеет большее время поиска и число вызовов целевой функции, но решение гарантированно находится благодаря свойствам глобального поиска ГА.

Шестизвенный трехмерный неизбыточный манипулятор

Данный манипулятор не избыточный, поэтому имеется ограниченное число решений. Описание шестизвенного манипулятора представлено в табл. 4.

Здесь КПМ и ГА имеют следующие значения: длина хромосомы $n = 6$; размер популяции $pSize = 100$; вероятность скрещивания $\rho_c = 0,5$; вероятность мутации $\rho_m = 0,85$; максимальное число популяций $N_{gnma} = N_{ga} = 10$; интенсификация после отсутствия улучшения в $k_s = 3$ поколениях; $k_l = 3$; $\gamma_{pa} = 0,75$; максимальное число шагов симплекса $N_{sim} = 50$. Проводился поиск решения для восьми положений манипулятора, разбросанных по рабочему пространству. Кинематика манипулятора изображена на рис. 5.

Результаты работы алгоритма представлены в табл. 5.

Как и в случае с трехмерным манипулятором, МВТ требует меньше времени на решения ОЗК, но при определенных начальных условиях решение не может быть найдено из-за зависимости этого алгоритма от градиента. ГА так-

Таблица 4

Параметры шестизвенного манипулятора

Параметр	Звено					
	1	2	3	4	5	6
σ_i	0	0	0	0	0	0
α_i , рад	$\pi/2$	0	$-\pi/2$	$\pi/2$	$-\pi/2$	0
a_i , м	0,500	0	0	0	0	0
d_i , м	0,700	0	0	0,600	0	0,200

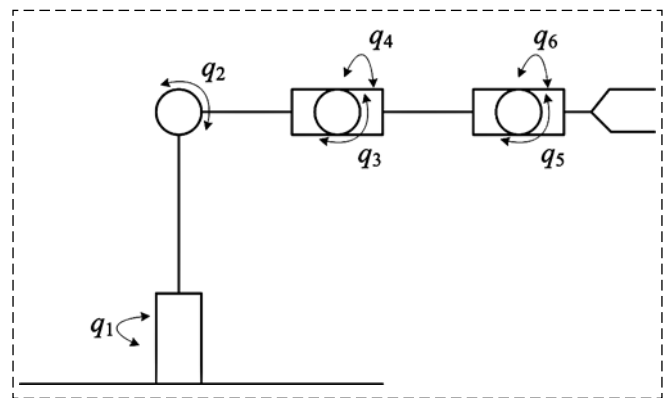


Рис. 5. Кинематика шестизвенного манипулятора

Таблица 5

Средние показатели поиска решения
для шестизвеного трехмерного манипулятора

Алгоритм	e_r , м	e_p , °	k	t , с
КПМ	0,004	0,13	5163	18,95
ГА, $pSize = 100$	0,069	5,26	12 121	28,28
ГА, $pSize = 200$	0,009	0,78	23 621	55,18
МВТ	0,001	0	258	2,5

же находит решение, но среднее время поиска решений в два раза больше среднего времени поиска КПМ.

Четырехзвенный избыточный манипулятор

Конструкция манипулятора является избыточной, поскольку число степеней свободы рабочего пространства меньше числа степеней свободы манипулятора ($m < n$). Это приводит к неограниченному числу решений ОЗК. Ки-

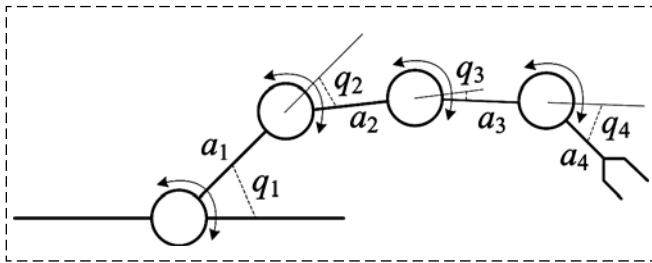


Рис. 6. Кинематика четырехзвенного манипулятора

Таблица 6

Параметры четырехзвенного манипулятора

Параметр	Звено			
	1	2	3	4
σ_i	0	0	0	0
α_i , рад	0	0	0	0
a_i , м	0,550	0,550	0,400	0,200
d_i , м	0	0	0	0

Таблица 7

Средние показатели поиска
для четырехзвенного планарного манипулятора

Алгоритм	e_r , м	e_p , °	k	t , с
КПМ	0	0,039	1595	4,51
ГА, $pSize = 15$	0,097	5,89	1836	4,51
ГА, $pSize = 100$	0	0,01	8364	18,37
МВТ	0,09	1,66	645	7

нематическая схема манипулятора представлена на рис. 6.

В табл. 6 даны параметры кинематики манипулятора.

Параметры КПМ: длина хромосомы $n = 3$; размер популяции $pSize = 15$; вероятность скрещивания $p_c = 0,5$; вероятность мутации $p_m = 0,85$; максимальное число популяций $N_{gnma} = N_{ga} = 10$; интенсификация после отсутствия улучшения в $k_s = 3$ поколениях; $k_l = 3$; $\gamma_{pa} = 0,75$; максимальное число шагов симплекса $N_{sim} = 50$. Для этого эксперимента заданные положения и ориентации соответствуют данным в эксперименте с трехзвенным манипулятором.

Результаты работы алгоритмов представлены в табл. 7.

Главной сложностью решения ОЗК избыточных манипуляторов является большое число возможных решений. В таких условиях ГА обладает преимуществом перед градиентным методом. КПМ и ГА нашли решения для всех положений, МВТ не смог найти решения для положений, при которых первое звено должно совершить поворот более чем на 180° . При этом ошибки по положению и ориентации КПМ при сходных с ГА характеристиках несравненно ниже.

Заключение

Был разработан алгоритм, основанный на комбинации ГА и СП для решения обратной задачи кинематики манипулятора. Исследования проводили на избыточных и неизбыточных манипуляторах. Результаты показали, что КПМ находит решение намного быстрее (в 4,8 раза), чем обычный ГА, и при этом требуется в среднем в 5,6 раза меньше вычислений целевой функции благодаря СП. Ошибки по положению и ориентации КПМ меньше, чем у ГА с аналогичными параметрами. Алгоритм обладает свойствами глобального и локального поиска, не требует градиента целевой функции, и решение находится всегда, если оно существует.

Список литературы

1. Chin K. W., Von Kinsky B. R., Marriott A. Closed-form and generalized inverse kinematics solutions for the analysis of human motion // Engineering in Medicine and Biology Society,

1997. Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE. 1997. Vol. 5. P. 1911–1914.
2. **Щербаков В. С., Корытов М. С., Коткин С. В.** Методика решения обратной кинематической задачи грузоподъемного крана // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2011. № 20. С. 71–76.
3. **Балакин П. Д., Шамутдинов А. Х.** Решение прямой и обратной задач кинематики оригинальной части шестикордиантного манипулятора // Альманах современной науки и образования. 2013. № 10 (77). С. 24–27.
4. **Orin D. E., Schrader W. W.** Efficient computation of the jacobian for robot manipulators // The International Journal of Robotics Research. 1984. Vol. 3, N. 4. P. 66–75.
5. **Whitney D. E.** Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses // IEEE Transactions on man-machine systems. 1969. Vol. 10, N. 2. P. 47–53.
6. **Buss S. R.** Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods // IEEE Journal of Robotics and Automation. 2004. Vol. 17. № 1–19. P. 16.
7. **Welman C.** Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation: PhD diss. Theses (School of Computing Science) / Simon Fraser University, 1993.
8. **Zhao J., Badler N. I.** Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures // ACM Transactions on Graphics (TOG). 1994. Vol. 13, N. 4. P. 313–336.
9. **Оськин Д. А., Дыда А. А.** Решение обратной задачи кинематики для манипуляционного робота методом штрафных функций // Фундаментальные исследования. 2015. Т. 4. № 11. С. 673–677.
10. **Parker J. K., Khoogar A. R., Goldberg D. E.** Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms // Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on. IEEE, 1989. P. 271–276.
11. **Tabandeh S., Clark C. M., Melek W.** A genetic algorithm approach to solve for multiple solutions of inverse kinematics using adaptive niching and clustering // Computer Science and Software Engineering. 2006. P. 63.
12. **Tabandeh S., Melek W., Clark C. M.** An adaptive niching genetic algorithm approach for generating multiple solutions of serial manipulator inverse kinematics with applications to modular robots // Robotica. 2010. Vol. 28, N 4. P. 493–507.
13. **Kenwright B.** Epigenetics & Genetic Algorithms for Inverse Kinematics // Experimental Algorithms. 2014. Vol. 9, N. 4 (39).
14. **Momani S., Abo-Hammour Z. S., Alsmadi O. M. K.** Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms // Applied Mathematics & Information Sciences. 2016. Vol. 10, N. 1. P. 225.
15. **Chelouah R., Siarry P.** Genetic and Nelder–Mead algorithms hybridized for a more accurate global optimization of continuous multimimima functions // European Journal of Operational Research. 2003. Vol. 148, N. 2. P. 335–348.
16. **Ramírez A., Rubiano F.** Optimization of Inverse Kinematics of a 3R Robotic Manipulator using Genetic Algorithms // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2011. Vol. 5, N. 11. P. 2236–2241.
17. **Zhang L., He J., Wang S.** Inverse Kinematic Solutions of Dual Redundant Camera Robot Based on Genetic Algorithm // Mathematical Problems in Engineering. 2017. Vol. 2017.
18. **Aguilar O. A., Huegel J. C.** Inverse kinematics solution for robotic manipulators using a CUDA-based parallel genetic algorithm // Mexican International Conference on Artificial Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. P. 490–503.
19. **Fan S. K. S., Liang Y. C., Zahara E.** A genetic algorithm and a particle swarm optimizer hybridized with Nelder–Mead simplex search // Computers & Industrial Engineering. 2006. Vol. 50, N. 4. P. 401–425.
20. **Kuo H. C., Chang J. R., Shyu K. S.** A hybrid algorithm of evolution and simplex methods applied to global optimization // Journal of Marine Science and Technology. 2004. Vol. 12, N. 4. P. 280–289.
21. **Durand N., Alliot J. M.** A combined nelder-mead simplex and genetic algorithm // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO. 1999. Vol. 99. P. 1–7.
22. **Denavit J., Hartenberg R. S.** An Iterative Method for tie Displacement Analysis of Spatial Mechanisms. 1964.
23. **Chelouah R., Siarry P., Berthiau G., De Barmon B.** An optimization method fitted for model inversion in non destructive control by eddy currents // The European Physical Journal Applied Physics. 2000. Vol. 12, N. 3. P. 231–238.

Hybrid Search Method for Solving the Inverse Kinematics of a Multilink Manipulator

R. T. Galemov, galemovruslan@gmail.com, **G. B. Masalsky**, gmasalsky@sfu-kras.ru,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Corresponding author: **Galemov Ruslan T.**, Postgraduate Student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation,
e-mail: galemovruslan@gmail.com,

Accepted March 19, 2018

The solution of the inverse kinematics problem of the manipulator is considered. The inverse kinematics problem of multi-link manipulators is a multi-extremal optimization problem with functional and positional constraints. Global optimization algorithms are commonly used to solve that kind of tasks. In this paper the solution of the inverse kinematics problem using the hybrid search method is considered. This method is a combination of genetic algorithm and simplex search. The genetic algorithm is not able to move quickly towards the optimum, but is able to find a global optimum on a multi-extremal function. Simplex search quickly moves toward a local minimum, but is not able to find a global minimum. This combination uses the strengths of both search algorithms, while covering the weaknesses. At each step of the genetic algorithm, the best individuals are selected to become the centers of simplex searches. Simplex searches improve the popu-

lation of the genetic algorithm. Thus, a global extremum can be found in several steps of the genetic algorithm. For testing several redundant and non-redundant manipulators was used and for each of them several desired positions was specified. In solving the inverse kinematics problems, the hybrid algorithm showed comparable accuracy with the genetic algorithm with larger number of calls of the objective function. In addition, this algorithm is very easy to implement and there are no issues associated with the gradients of the objective function and functional limitations. This method allows us to find solutions for non-redundant and redundant manipulators.

Keywords: multilink manipulator, inverse kinematics problem, genetic algorithm, simplex search, hybrid search method

For citation:

Galemov R. T., Masalsky G. B. Hybrid Search Method for Solving the Inverse Kinematics of a Multilink Manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 464–473.

DOI: 10.17587/mau.19.464-473

References

1. **Chin K. W., Von Kinsky B. R., Marriott A.** Closed-form and generalized inverse kinematics solutions for the analysis of human motion, *Engineering in Medicine and Biology Society, 1997. Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE*, 1997, vol. 5, pp. 1911–1914.
2. **Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Kot'kin S. V.** Metodika resheniya obratnoj kinematicheskoy zadachi gruzopod'emnogo krana (Methodology for solving the inverse kinematic problem of a load-lifting crane), *Vestnik Sibirskoy Gosudarstvennoy Avtomobil'no-Dorozhnoy Akademii*, 2011, no. 20, pp. 71–76 (in Russian).
3. **Balakin P. D., Shamutdinov A. H.** Reshenie pryamoj i obratnoj zadach kinematiki original'noj chasti shestikoordinatnogo manipulyatora (The solution of the direct and inverse kinematics problems of the original part of the six-coordinate manipulator), *Al'manah Sovremennoj Nauki i Obrazovaniya*, 2013, no. 10 (77), pp. 24–27 (in Russian).
4. **Orin D. E., Schrader W. W.** Efficient computation of the jacobian for robot manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, 1984, vol. 3, no. 4, pp. 66–75.
5. **Whitney D. E.** Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, 1969, vol. 10, no. 2, pp. 47–53.
6. **Buss S. R.** Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2004, vol. 17, no. 1–19, 16 p.
7. **Welman C.** Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation: PhD diss., Theses (School of Computing Science), Simon Fraser University, 1993.
8. **Zhao J., Badler N. I.** Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1994, vol. 13, no. 4, pp. 313–336.
9. **Os'kin D. A., Dyda A. A.** Reshenie obratnoj zadachi kinematiki dlya manipulyacionnogo robota metodom shtrafnih funkcij (Solution of the inverse kinematics problem for a manipulation robot with the penalty functions method), *Fundamental'nye Issledovaniya*, 2015, vol. 4, no. 11, pp. 673–677 (in Russian).
10. **Parker J. K., Khoogar A. R., Goldberg D. E.** Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms, *Robotics and Automation, Proceedings of 1989 IEEE International Conference, IEEE*, 1989, pp. 271–276.
11. **Tabandeh S., Clark C. M., Melek W.** A genetic algorithm approach to solve for multiple solutions of inverse kinematics using adaptive niching and clustering, *Computer Science and Software Engineering*, 2006, 63 p.
12. **Tabandeh S., Melek W., Clark C. M.** An adaptive niching genetic algorithm approach for generating multiple solutions of serial manipulator inverse kinematics with applications to modular robots, *Robotica*, 2010, vol. 28, no. 4, pp. 493–507.
13. **Kenwright B.** Epigenetics & Genetic Algorithms for Inverse Kinematics, *Experimental Algorithms*, 2014, vol. 9, no. 4 (39).
14. **Momani S., Abo-Hammour Z. S., Alsmadi O. M. K.** Solution of inverse kinematics problem using genetic algorithms. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2016, vol. 10, no. 1, 225 p.
15. **Chelouah R., Siarry P.** Genetic and Nelder–Mead algorithms hybridized for a more accurate global optimization of continuous multimimima functions, *European Journal of Operational Research*, 2003, vol. 148, no. 2, pp. 335–348.
16. **Ramírez A., Rubiano F.** Optimization of Inverse Kinematics of a 3R Robotic Manipulator using Genetic Algorithms, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2011, vol. 5, no. 11, pp. 2236–2241.
17. **Zhang L., He J., Wang S.** Inverse Kinematic Solutions of Dual Redundant Camera Robot Based on Genetic Algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, vol. 2017.
18. **Aguilar O. A., Huegel J. C.** Inverse kinematics solution for robotic manipulators using a CUDA-based parallel genetic algorithm, *Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 490–503.
19. **Fan S. K. S., Liang Y. C., Zahara E.** A genetic algorithm and a particle swarm optimizer hybridized with Nelder — Mead simplex search, *Computers & Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 4, pp. 401–425.
20. **Kuo H. C., Chang J. R., Shyu K. S.** A hybrid algorithm of evolution and simplex methods applied to global optimization, *Journal of Marine Science and Technology*, 2004, vol. 12, no. 4, pp. 280–289.
21. **Durand N., Alliot J. M.** A combined nelder-mead simplex and genetic algorithm, *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO*, 1999, vol. 99, pp. 1–7.
22. **Denavit J., Hartenberg R. S.** An Iterative Method for tie Displacement Analysis of Spatial Mechanisms, 1964.
23. **Chelouah R., Siarry P., Berthiau G., De Barmon B.** An optimization method fitted for model inversion in non destructive control by eddy currents, *The European Physical Journal Applied Physics*, 2000, vol. 12, no. 3, pp. 231–238.

Д. Г. Грязин, д-р техн. наук, нач. отдела, gdg@mt.IFMO.ru,
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Научно-исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

Вопросы создания восполняемых источников энергии морских автономных подводных роботизированных комплексов¹

Рассматриваются пути создания восполняемых источников энергии морских объектов, работающих в отсутствие солнечной энергии. Очевидно, что продолжительность работы многих морских подводных аппаратов ограничена зарядом их аккумуляторных батарей. При работе на малых глубинах такие аппараты находятся в среде, возмущенной волнами, и имеют качку. Поверхностные плавающие буи также подвержены возмущениям от морского волнения. При их эксплуатации в условиях полярной ночи использование солнечной энергии для заряда батарей также становится затруднительным. Для решения указанной задачи предложено использовать энергию поверхностных волн или качки объекта. Энергия от волнового течения и орбитальной скорости движения частиц воды в волне может быть преобразована во вращение вертушки. Рассматриваются теоретические основы использования таких устройств для сбора энергии и их возможности. Указывается, что установка нескольких подобных устройств, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях, позволит преобразовывать энергию, возникающую и от поступательного движения подводного аппарата при изменении его глубины. Кроме того, обсуждается использование энергии качки объекта для ее преобразования в электрическую энергию. Эта идея чрезвычайно привлекательна и потому не является новой. Однако подобные генераторы никогда не использовались на морских роботизированных объектах. Рассматривается конструкция индукционного генератора, которая запатентована автором. Показано, что ее работа описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Предложено использовать в подобных преобразователях, настройку электро-механической системы в резонанс с преобладающими колебаниями качки. Для этого можно изменять степень успокоения колебательной системы. Обсуждаются возможные технические решения и физические принципы их работы. Проведена оценка мощности таких малогабаритных преобразователей. Выполнено сравнение с существующими подобными образцами. Показано, что предложенные генераторы могут вырабатывать энергию в несколько десятков ватт.

Ключевые слова: восполнение энергии, морские автономные аппараты, буй, качка, ветровые волны

Введение

Задача создания источников для восполнения энергии батарей подвижных объектов всегда была актуальной. Во многих случаях она решается путем применения солнечных батарей, качество которых постоянно улучшается. В том случае, если объект работает в условиях полярной ночи или под поверхностью воды, создание источников восполнения энергии становится затруднительным.

В настоящее время энергетический ресурс морских подповерхностных буев, донных станций, метеорологических буев для высоких широт ограничен емкостью применяемых аккумуляторных батарей. В последнее время к числу таких традиционных объектов добавились подводные глайдеры и подводные автономные необитаемые аппараты — носители роботизированных комплексов. Отметим, что объем задач, решаемых с помощью этих роботизированных комплексов, напрямую зависит от ем-

кости аккумуляторной батареи носителя, что сделало задачу восполнения заряда аккумуляторных батарей без использования солнечной энергии еще более актуальной. Очевидно, что число физических явлений, которые можно использовать для выработки электрической энергии в условиях работы указанных объектов, очень ограничено. В электрическую энергию могут быть преобразованы следующие виды кинетической энергии:

- от морских поверхностных гравитационных волн;
- от качки носителя;
- от подповерхностного волнового движения частиц воды;
- от морских течений;
- от погружения или всплытия носителя.

Использование того или иного вида энергии возможно в зависимости от того, установлен ли объект — носитель роботизированного комплекса стационарно под водой или является подвижным аппаратом.

Вопросы создания подобных источников энергии были тщательно проработаны в книге М. Мак-Кормика [4], который предложил схе-

¹Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-00010.

мы преобразователей и обосновал принципы их расчета. В настоящее время крупные промышленные преобразователи волновой энергии в электрическую выпускаются промышленно. Одним из мировых лидеров их производства является датская компания Wave Star Energy [8]. В Советском Союзе подобными преобразователями занимались ученые кафедры судостроения и судоремонта Калининградского технологического института под руководством проф. Н. Б. Севастьянова в конце 80-х лет прошлого столетия. Они обратили внимание на тот факт, что морское судно в условиях плавания может рассматриваться как естественный источник накопления энергии волн, которую в дальнейшем и будет расходовать. При этом использование преобразователей энергии волн на борту поможет в борьбе с качкой корабля. В начале 90-х проработкой схем плавающих преобразователей энергии волн занимался А. А. Темев [5, 6], который в настоящее время довел свои разработки до стадии испытаний экспериментальных образцов [7].

Очевидно, что в настоящее время в мире получили распространение волновые генераторы значительной мощности и больших габаритных размеров, работающие от энергии поверхностных гравитационных волн, однако отсутствуют малогабаритные генераторы для восполнения энергии аккумуляторных батарей автономных подводных подвижных объектов.

Возможности использования энергии подповерхностных волн

Из теории поверхностных гравитационных волн известно [1], что частицы воды в волне движутся по эллиптическим траекториям, причем высота волны h связана с радиусом орбитального движения частиц воды соотношением $h = 2r$, где r — радиус орбитального движения частиц воды на поверхности. Орбиты движения затухают с глубиной Z по закону $\gamma_m = e^{-KZ}$, где $K = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны. При этом траектории замкнуты, и нет увлечения частиц воды при деформации свободной поверхности. Распространяется лишь сама деформация [1]. Отметим, что вертикальная полуось орбит уменьшается с глубиной быстрее, чем горизонтальная [2], и на предельной глубине, приближающейся к дли-

не волны, частицы воды колеблются на отрезке горизонтальной прямой. В том случае, если мы имеем дело с гармонической волной конечной амплитуды, профиль отдельной волны в жидкости бесконечной глубины перемещается с фазовой скоростью $V_C = \frac{\omega}{K}$.

Основные параметры волнового движения в жидкости бесконечной глубины связаны между собой следующими выражениями:

$$V_C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{g\tau}{2\pi}; \quad (1)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}; \quad \omega = \frac{2\pi}{\tau},$$

где τ — период волны; V_C — фазовая скорость волн; λ — длина волны.

Из выражения (1) видно, что фазовая скорость волны тем выше, чем больше ее длина.

Отметим, что кроме фазовой скорости волны имеют еще групповую скорость движения [2]. Групповая же скорость тем больше, чем круче волна, и в общем случае в два раза меньше фазовой скорости волн. Очевидно, что каждая из волн определенной длины имеет свою скорость. В связи с этим волны постоянно складываются и преобразуются, что особенно заметно при визуальных наблюдениях.

Таким образом, на носитель, находящийся на глубине менее половины длины поверхностной волны, будет действовать не только гидростатическое давление, но и гидродинамическое волновое давление, вызванное фазовой скоростью движения частиц воды в волне, вектор которой соответствует направлению бега волн при прохождении гребня и направленный в обратном направлении при прохождении подошвы:

$$P = \rho gz + \rho g r \gamma_m \cos \omega t, \quad (2)$$

где ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения; r — амплитуда поверхностной волны; ω — угловая частота; Z — глубина погружения носителя.

Отметим, что скорости движения частиц воды V_C также затухают с глубиной по экспоненциальному закону [2].

$$V_C = r \omega e^{-KZ}. \quad (3)$$

Кроме того, на объект, находящийся во взволнованной среде, будет действовать давле-

ние, вызванное групповой скоростью волн, и возможное подводное течение. Длина развитых волн на открытых акваториях лежит в пределах до нескольких сотен метров, что приводит к ощутимой качке подводных объектов на глубинах до 50 м, а в условиях шторма даже на больших глубинах.

Указанная энергия подповерхностных волн, обусловленная скоростью потока воды (3), пропорциональной второму члену уравнения (2), может быть использована генераторами электроэнергии, расположенными как на стационарно установленных на глубине подводных объектах, так и на движущихся подводных аппаратах. Эти генераторы будут воспринимать также давление, вызванное подводным течением. Для сбора такой энергии может быть использована крыльчатка, например, представленная на рис. 1, сопряженная с ротором электрической машины, ориентированная по направлению бега волн или направлению течения.

Сила, вызывающая ее вращение, обусловленное скоростью движения частиц воды, определяется выражением

$$F = K_C \rho \frac{V^2}{2},$$

где K_C — гидродинамический коэффициент, зависящий от особенностей вертушки и скорости потока; V — скорость потока.

Установка нескольких подобных устройств, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях, позволит преобразовывать энергию, возникающую и от поступательного движения глайдера. Подобные крыльчатки, оснащенные электрическими машинами, могли бы выполнять роль не только генераторов энергии, но и движительного комплекса автономного аппарата, возможно использование



Рис. 1. Крыльчатка в обечайке

их и как запасного движительного комплекса. Работа такой крыльчатки по сбору волновой энергии была проверена в опытовом волновом бассейне Крыловского государственного научного центра.

Использование энергии качки объекта

Идея использования энергии качки судна для ее преобразования в электрическую является очень привлекательной. Над ней до сих пор трудятся последователи известного заслуженного ученого кораблестроителя проф. Н. Б. Севастьянова [9]. Для сбора энергии от качки плавающих объектов обычно предлагается использовать маятниковую систему, представляющую собой обращенный осевой или угловой акселерометр разомкнутого типа [5, 6, 9 и др]. Такие генераторы вырабатывают электроэнергию с помощью электромагнитной системы, имеющей в своем составе постоянный магнит, или управляют поршнем, который способствует аккумулированию энергии, преобразуемой в итоге в электрическую. Следует отметить, что подобные системы являются колебательными, а для повышения их КПД может быть использован принцип настройки в резонанс колебательных систем. В случае использования колебательной системы для преобразователя энергии качки в электрическую такая система должна быть настроена в резонанс с преобладающей частотой качки. Этот принцип может быть реализован в технических схемах, построенных по различным кинематическим схемам. Например, для осевой маятниковой системы, имеющей пружину, например, осевого акселерометра, уравнение второго порядка будет иметь хорошо известный вид:

$$m\ddot{\alpha} + K\dot{\alpha} + c_{\text{ж}}\alpha = -Q\ddot{x},$$

где m — масса инерционного тела; α — его отклонение; $c_{\text{ж}}$ — жесткость упругого элемента; Q — закон изменения действующего ускорения $\ddot{x}$.

Очевидно, что выражение для частоты собственных колебаний механической системы ω_c имеет вид

$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2},$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{c_{\text{ж}}}{m}}$ — частота свободных, недемпфированных колебаний системы; $\xi = \frac{K_{\text{Д}}}{2\sqrt{mc_{\text{ж}}}}$ —

степень успокоения системы; K_d — коэффициент демпфирования.

Из приведенных выражений видно, что изменение частоты собственных колебаний механической системы эффективнее всего достигается за счет изменения коэффициента демпфирования.

Кинематическая схема устройства, реализующего этот принцип [3], представлена на рис. 2.

Генератор состоит из подвижной массы 1, перемещающейся вертикально и кинематически связанной с демпфером 2. Указанная масса подвешена в направляющих на пружине 3 через блоки с использованием гибких тяг. Один из роликов блока установлен на роторе генератора переменного тока 4. Таким образом, на качке за счет колебаний подвижной массы приводится во вращение ротор генератора. Для настройки в резонанс с качкой механической системы служит демпфер, воздушное отверстие которого для изменения площади сечения перекрывается диском, управляемым шаговым двигателем 5. Управление элементами генератора осуществляется от контроллера 8, который определяет среднюю частоту качки и управляет демпфером, кроме того, он управляет подключением обмоток трансформатора 6 для предотвращения перезаряда аккумуляторной батареи 7.

Предложенный принцип может быть реализован и на основе генератора без преобразова-

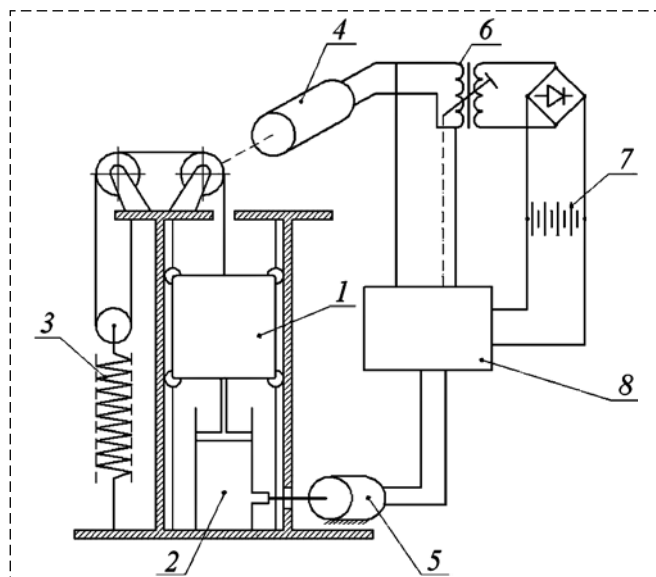


Рис. 2. Генератор для восполнения энергии аккумуляторов, использующий качку объекта

ния линейного перемещения подвижной массы в угловое, а для регулировки силы демпфирования можно использовать и иные схемные решения. Очевидно, что указанные методы восполнения энергии будут наиболее актуальными в аппаратах и буях малого водоизмещения, однако они могут найти применение и при пополнении энергии батарей автономных приборов связи и сигнализации, служащих для контроля местоположения транспортных контейнеров, систем автономной сигнализации транспортных объектов и др.

Таким образом, путями решения проблемы восполнения энергии аккумуляторных батарей подвижных морских подводных автономных роботизированных комплексов может быть использование энергии качки таких аппаратов или энергии от морских подповерхностных волн и течений. Технические средства для сбора такой энергии могут иметь различные кинематические схемы и исполнения, однако для их реализации целесообразно использовать генераторы, сопряженные с крыльчатками, или индукционные преобразователи колебаний.

Оценка мощности преобразователей

Детальный расчет мощности предложенных преобразователей при заданных условиях эксплуатации, является предметом отдельного исследования, однако оценить порядок вырабатываемой мощности несложно.

Мощность, вырабатываемая преобразователем на основе крыльчатки, будет зависеть от набегающего потока воды. Представим себе, что крыльчатка стационарно закреплена на некоторой глубине Z и ориентирована по направлению распространения волн с помощью конструкции ее обтекателя. Очевидно, что на нее будет действовать поток частиц воды, и тогда скорость движения частиц воды будет равна

$$V_B = V_C + V_T + V_T,$$

где V_T — групповая скорость волн; V_T — скорость течения.

Значимое значение скорости V_C , определяемой выражением (3), будет достигаться при условии установки вертушки на глубину менее четверти длины волны, что позволит не оголять преобразователь при прохождении подошвы волны. В то же время установка пре-

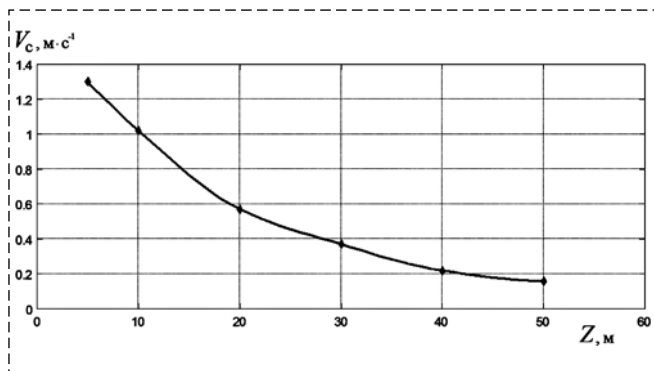


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости движения частиц воды от глубины для шестибалльного волнения

образователя на большую глубину приведет к значительному уменьшению скорости потока воды от волнового движения. На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости фазовой скорости движения частиц воды V_c от заглубления крыльчатки Z на волнении интенсивностью 6 баллов с высотой волн 5 м, периодом 9 с и длиной 126 м [10]. Для расчета использовались выражения (1).

Из рис. 3 видно, что для эффективной работы преобразователя его следует устанавливать на глубину не более 10 м.

В настоящее время на морских яхтах активно используются источники подзаряда батарей на основе вертушечных генераторов. Такие генераторы имеют конструкцию в виде пилонa с вертушкой и просто закрепляются на корме яхты аналогично подвесному мотору [11, 12 и др.]. При этом диаметр их винта составляет примерно 200 мм. Конструкция некоторых из них предполагает простую буксировку вслед за яхтой на кабель-тросе. На рынке представлены генераторы с разным числом лопастей и даже с винтом регулируемого шага. Анализ предложенных в интернете характеристик показывает, что при скорости 1 м/с такой генератор способен выработать несколько ватт энергии. Учитывая, что в расчетах скорости потока воды, набегающей на вертушку, использовалось значение амплитуды волны, отсутствовал учет групповой скорости волн и возможного течения, можно сделать вывод о том, что с помощью предложенного вертушечного преобразователя энергии подповерхностных волн и течений можно получить энергию значением от нескольких ватт до нескольких десятков ватт.

Индукционные преобразователи скорости на основе линейно перемещающейся массы

также присутствуют на рынке. Одним из таких образцов является генератор для подзарядки аккумуляторных батарей мобильных телефонов nPower PEG, работающий при ходьбе пешехода. Генератор имеет массу 255 г, длину 230 мм. При энергичной ходьбе он вырабатывает энергию до 4 Вт [13]. Очевидно, что указанный преобразователь при работе в условиях качки носителя, сможет выработать энергию мощностью несколько десятков ватт, а в случае увеличения размеров его электромагнитной системы — еще больше.

Заключение

Таким образом, путями решения проблемы восполнения энергии аккумуляторных батарей подвижных морских подводных автономных роботизированных комплексов может стать использование энергии качки таких аппаратов или энергии от морских подповерхностных волн и течений. Технические средства для сбора такой энергии могут иметь различные кинематические схемы и исполнения, однако для их реализации целесообразно использовать генераторы, сопряженные с крыльчатками или индукционные преобразователи колебаний. Возможно использование комбинированных преобразователей, каждый из которых способен вырабатывать энергию в несколько десятков ватт. Следует отметить и то, что выработка энергии такими преобразователями возможна лишь при условии плавания на малых глубинах — там, где объекты испытывают воздействие подповерхностных волн. С точки зрения эффективности решения целевых задач автономным аппаратом это не всегда оправданно, однако периодическое всплытие аппаратов возможно и связано с требованиями выхода на связь и измерениями гидрофизических характеристик на подповерхностных горизонтах. Очевидно, что применение таких преобразователей на поверхностно плавающих морских буях значительно увеличит их автономность, особенно при работе в условиях полярной ночи.

Список литературы

1. Лакомб А. Физическая океанография. М.: Мир, 1974.
2. Луговский В. В. Динамика моря. Л.: Судостроение, 1976.

3. Грязин Д. Г., Величко О. О. Установка для восполнения энергии морских буев. Патент на изобретение № 2577924 опубликован 20.03.2016 бюл. № 8.

4. Мак-Кормик М. Преобразование энергии волн. М.: Энергоатомиздат, 1985.

5. Поплавковая волновая электростанция. Патент на изобретение, автор Темеев А. А. F03B 13/20 № 2016227 C1, опубликован 15.07.94.

6. Поплавковая волновая электростанция. Патент на изобретение, автор Темеев А. А. F03B 13/16 № 2037642 C1, опубликован 19.06.95.

7. Бородин В. Электростанция — Океан // Изобретатель и рационализатор. 2014. № 3.

8. URL: <http://wavestarenergy.com/>

9. Жуков В. А., Паллаг С. П. Альтернативные источники энергии: некоторые результаты исследований преобразователей энергии морских волн // Известия Калининградского государственного технического университета. 2015. № 38.

10. Бородай И. К., Невцетаев Ю. А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982.

11. URL: <http://pdf.nauticexfo.com/pdf/cristec/cristec-hydro-generator/22250-52533.html>

12. URL: <https://www.wattandsea.com/fr>

13. URL: <http://www.macdigger.ru>

The Issues of Development of Renewable Energy Sources for Marine Autonomous Underwater Robotic Complexes

D. G. Gryazin, gdg@mt.IFMO.ru,

The State Research Center of The Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg, 197046, Russian Federation

Corresponding authors: Gryazin Dmitry G., D. Sc., Associate Professor, The State Research Center of The Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation.

Accepted on March 04, 2018

The paper considers the options of renewable power sources development for marine objects operated in absence of solar energy. Operation of many undersea vehicles is evidently limited by their battery charge. When operating at shallow depths, such vehicles experience pitch and roll in the wave-perturbed environment. Buoys floating on the water surface are also disturbed by sea waves. Moreover, when they are operated during polar night, solar energy cannot be used for charging their batteries. To solve this problem, it is proposed to use the energy of surface waves or the vehicle pitch and roll. It is quite possible to transform the energy of wave current and the orbital velocity of water particles motion into propeller rotation. Basic theory of using such devices for energy accumulation and their capabilities are studied. It is stated that several such devices installed in orthogonal directions relative to each other will transform the energy that is also generated by the undersea vehicle's propulsion when its depth is changing. Furthermore, the vehicle pitch/roll energy transformation into electric power is discussed. This idea is extremely attractive, so it is not new. However, generators of this type have never been used on undersea robotic vehicles. The paper presents an induction generator designed and patented by the author. It is shown that its operation is described by a differential equation of the 2nd order. It is proposed to adjust the electromechanical system of such transformers to be resonant with the dominant pitch/roll oscillations. This can be done by varying the degree of the oscillating system damping. Potential engineering solutions and physical principles of their operation are discussed. The proposed small-size transformers are estimated in terms of power capacity and compared to the existing similar devices. It is demonstrated that the proposed generators are able to generate power of a few dozens Watt.

Keywords: renewal of energy, marine autonomous devices, buoys, pitching, wind waves

Acknowledgements: This article was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (17-08-00010).

For citation:

Gryazin D. G. The Issues of Development of Renewable Energy Sources for Marine Autonomous Underwater Robotic Complexes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 474—479.

DOI: 10.17587/mau.19.474-479

References

1. Lacombe A. *Fizicheskaya okeanografiya* (Physical Oceanography), Moscow, Mir, 1974 (in Russian).

2. Lugovsky V. V. *Dinamika morya* (Dynamics of the sea), Leningrad, Shipbuilding, 1976 (in Russian).

3. Gryazin D. G., Velichko O. O. *Ustanovka dlya vospolneniya energii morskikh buev* (Installation for replenishing the energy of sea buoys), The patent for invention № 2577924 was published on 03/20/2016. № 8 (in Russian).

4. McCormick M. *Preobrazovanie energii voln* (Transformation of wave energy), Moscow, Energoatomizdat, 1985 (in Russian).

5. *Poplavkovaya volnovaya elektrostantsiya* (Float wave power station), Patent for invention, author — Temeyev A. A. F03B 13/20 No. 2016227 C1, was published on July 15, 1994 (in Russian).

6. *Poplavkovaya volnovaya elektrostantsiya* (Float wave power station), Patent for invention, author — Temeyev A. A. F03B 13/16 No. 2037642 C1, was published on June 19, 1995 (in Russian).

7. Borodin V. *Elektrostantsiya — Okean* (Power station — Ocean), *Inventor and Rationalizer*, 2014, no. 3 (in Russian).

8. Available at: <http://wavestarenergy.com/>

9. Zhukov V. A., Pallag S. P. *Alternativnye istochniki energii: nekotorye rezul'taty issledovaniy preobrazovatelei energii morskikh voln* (Alternative energy sources: some results of studies of sea-wave energy converters), *Izvestiya Kaliningrad State Technical University*, 2015, no. 38 (in Russian).

10. Borodai I. K., Netsvetaev Yu. A. *Morekhodnost' sudov* (Seaworthiness of ships), Leningrad, Shipbuilding, 1982 (in Russian).

11. Available at: <http://pdf.nauticexfo.com/pdf/cristec/cristec-hydro-generator/22250-52533.html>

12. Available at: <https://www.wattandsea.com/fr>

13. Available at: <http://www.macdigger.ru>

М. З. Досаев, канд. физ.-мат. наук, доц., dosayev@imec.msu.ru,

Ю. Д. Селюцкий, канд. физ.-мат. наук, доц., seliutski @imec.msu.ru,

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва,

Ч. С. Е, канд. физ.-мат. наук, longerplus@gmail.com, **Ф. Ч. Су**, проф., fcsu@mail.ncku.edu.tw,

Национальный университет Чен Кун, г. Тайнань, Тайвань

Моделирование тактильной обратной связи, реализуемой с помощью пьезоэлектрического привода¹

Отсутствие тактильной обратной связи в минимально инвазивной хирургии во многих случаях повышает сложность операции и приводит к увеличению времени ее проведения. Исследование нацелено на создание системы, обеспечивающей передачу тактильных ощущений и состоящей из мастер-манипулятора, блока управления и исполнительного устройства, оснащенного датчиком усилия. Пользователь нажимает на кнопку манипулятора, зафиксированную на ползуне. Движение этой кнопки синхронизируется с движением ведомого исполнительного звена, которое индентруется в мягкую ткань. Нагрузка на индентор измеряется датчиком усилия и затем передается в блок управления. Блок управления задает рабочую частоту пьезоэлектрического привода (ПЭП), формирующую силу, соответствующую измеренной нагрузке. Эта сила прикладывается к кнопке манипулятора и ощущается пользователем. Таким образом, система обеспечивает тактильную обратную связь. Для описания динамики приводного механизма ПЭП, контактирующего с ползуном, используется конечномерная эмпирическая модель. Параметры модели идентифицируются на основе экспериментальных данных. Показано, что система позволяет различать объекты с различными характеристиками жесткости.

Ключевые слова: тактильное ощущение, пьезоэлектрический привод, математическая модель, идентификация параметров, локальная жесткость, трение

Минимально инвазивная хирургия (*MIS*) — это новая технология, в которой хирург работает с небольшими разрезами размером около 10 мм. Благодаря уменьшению разрезов *MIS* позволяет пациентам быстрее восстанавливаться и испытывать меньшую боль, чем традиционные методы. Для *MIS* необходимы два компонента: монитор, который дает визуальную обратную связь хирургу в режиме реального времени для внутренней среды, и набор специализированных хирургических инструментов, адаптированных для минимально инвазивной хирургии, которые вводятся через небольшие разрезы для манипулирования внутренними органами.

Относительно недавно были разработаны хирургические роботизированные системы, которые объединяют эти два компонента [1, 2]. Наиболее известным примером является хирургическая система *da Vinci (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA)*.

Во время открытых полостных операций хирургии используют тактильную обратную связь для определения различных характеристик ткани. В *MIS* из-за отсутствия такой обратной связи хирурги могут полагаться только на визуальное изображение внутренних полостей

в режиме реального времени. Некоторые сосуды или нервы внутри органов невидимы. Без тактильного ощущения иногда бывает трудно принять правильные оперативные решения, и поэтому хирургические риски могут возрасти. В работах [3, 4] показано, что в *MIS* необходима тактильная обратная связь. Ряд статей [5–7] посвящен проблемам разработки устройств, предоставляющих такую связь для хирургов.

Некоторые пьезоэлектрические элементы [8–12] могут создавать эллиптическое движение их наконечника из-за комбинации изгиба и продольного движения конструкции. Если наконечник прижат к ползуну, то можно получить линейный ультразвуковой приводной механизм. Преимущества пьезоэлектрического привода, такие как быстрый отклик, высокая плотность усилия и гибкая настройка, позволяют использовать его в качестве приводного механизма, обеспечивающего тактильное ощущение. В. Вурптс и Дж. Твифел [9] предложили моделировать такой двигатель с помощью осциллятора с двумя степенями свободы. Динамическое моделирование ультразвукового двигателя с использованием точечной контактной модели между статором и ротором также рассматривалось в работах [10, 12]. Было показано, что такой подход может достаточно точно оценить реакцию движения ротора.

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-58-52033, 18-01-00538).

В данной работе предложена идея системы тактильной обратной связи, передающей ощущение локальной жесткости мягкой ткани, в которой для генерирования ответного усилия в мастер-манипуляторе используется линейный пьезоэлектрический исполнительный механизм.

Прототип устройства разработан и изготовлен, проведены предварительные эксперименты. Для моделирования динамического поведения системы создана конечномерная модель. Найдены параметры модели, которые позволяют адекватно описать движения пьезоэлектрического привода (ПЭП). Показано, что система позволяет различать объекты с различными характеристиками жесткости.

Предварительный эксперимент с ПЭП

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) показана схема прототипа системы тактильной обратной связи. Система состоит из трех основных частей: мастер-манипулятора, блока управления и исполнительного устройства, оснащенного датчиком усилия. Когда пользователь нажимает на кнопку манипулятора, прикрепленную к ползуну, она начинает перемещаться. Смещение кнопки фиксируется датчиком, и соответствующий сигнал подается на шаговый двигатель, приводящий в движение ведомое исполнительное звено. Исполнительное звено индентируется в мягкую ткань. Нагрузка на индентор измеряется датчиком усилия и затем передается в блок управления, который формирует рабочую частоту ПЭП,

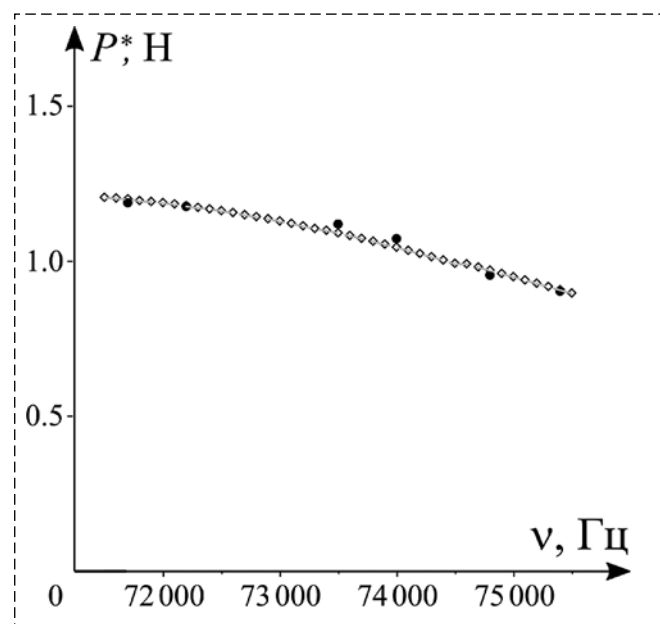


Рис. 2. Зависимость силы P^* от частоты ν возбуждения

обеспечивающую силу воздействия на ползун, равную измеренной нагрузке. Эта сила через кнопку манипулятора может ощущаться пользователем. Таким образом, система обеспечивает тактильную обратную связь.

Для оценки усилия, создаваемого ПЭП, было проведено его тестирование. На электроды пьезоэлемента подавалось переменное напряжение 300 В с различной частотой возбуждения в диапазоне 60...80 кГц. Данный диапазон был определен методом конечных элементов (не описан в рамках этой статьи). Кнопка манипулятора двигалась вверх и упиралась в датчик усилия. Датчик усилия приводился в движение вибрационным двигателем с частотой 5 Гц и амплитудой 0,2 мм. Показания датчика, соответствующие данной частоте, фиксировались. Максимальная сила (118 г) была получена при 71,7 кГц. Результаты испытаний показаны черными кружками на рис. 2.

Феноменологическая математическая модель ПЭП

Будем для простоты считать, что вся установка расположена в горизонтальной плоскости.

В рамках феноменологической модели ПЭП предполагается, что основание головки привода совершает гармонические колебания по закону $x_b = A_{x0} + A_x \sin \nu t$, $y_b = A_y \sin(\nu t + \Phi)$ (рис. 3, см. третью сторону обложки). Наличие среднего смещения A_{x0} связано с силой предварительного нагружения N , прикладываемой к ПЭП. Внутренняя динамика зоны контакта головки с ползуном описывается с помощью осциллятора с двумя степенями свободы.

Уравнения движения подсистемы, описывающей динамику ползуна с кнопкой, приводимого в движение пьезоэлектрическим линейным двигателем, могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_s \ddot{y}_s &= F - P - m_s g + F_f; \\ m_a \ddot{y}_a &= -k_x(x_a - x_b) - h_x(\dot{x}_a - \dot{x}_b) - k_c x_a - h_c \dot{x}_a; \\ m_a \ddot{y}_a &= -k_y(y_a - y_b) - h_y(\dot{y}_a - \dot{y}_b) - F. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь y_s — координата центра масс ползуна; m_s — масса ползуна; F — сила, действующая на ползун со стороны ПЭП; F_f — сила трения, действующая на ползун со стороны направляющей; P — сила, прикладываемая пользователем к кнопке; g — ускорение свободного падения; N — сила прижатия ПЭП к ползуну; x_a , y_a — координаты осциллятора; m_a — масса осциллятора; k_x , k_y , k_c — эффективные коэффици-

циенты жесткости; h_x , h_y , h_c — эффективные коэффициенты демпфирования. Сила F , действующая на ползун со стороны головки привода, определяется следующим соотношением: $F = -\mu \operatorname{sgn}(\dot{y}_s - \dot{y}_a)(k_c x_a + h_c \dot{x}_a)$. Здесь μ — коэффициент сухого трения между головкой и ползуном. Сила трения F_f описывается формулой $F_f = -f \operatorname{sgn} \dot{y}_s (k_c x_a + h_c \dot{x}_a)$, где f — соответствующий коэффициент трения.

Среднее смещение A_{x0} определяется из уравнений равновесия:

$$0 = -k_x(x_{a0} - A_{x0}) - k_c x_{a0}; \quad k_x(x_{a0} - A_{x0}) = N,$$

где x_{a0} — положение осциллятора в состоянии равновесия. Отсюда получаем:

$$x_{a0} = -\frac{N}{k_c}, \quad A_{x0} = -N \left[\frac{1}{k_x} + \frac{1}{k_c} \right].$$

Изменение N ведет к изменению среднего значения упругой силы, действующей на ползун, и, следовательно, к изменению тянущей силы, создаваемой ПЭП.

Система уравнений (1) замкнута, если задана частота ν возбуждения двигателя и усилие P .

Сила, ощущаемая пользователем при нажатии на кнопку, описывается следующей формулой:

$$P = F + F_f - m_s \ddot{y}_s - m_s g. \quad (2)$$

Теперь запишем уравнения движения подсистемы, описывающей движение индентора, упирающегося в мягкую ткань, и соединенного с ним линейного шагового двигателя:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{y}_i &= N_i - F_i; \\ J \ddot{\theta} &= -\kappa I_A \sin n\theta + \kappa I_B \cos n\theta - \chi \dot{\theta} - F_i r; \\ L \dot{I}_A &= V_A - R I_A + \kappa \dot{\theta} \sin n\theta; \\ L \dot{I}_B &= V_B - R I_B + \kappa \dot{\theta} \cos n\theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь y_i — координата индентора; m_i — масса индентора; N_i — сила, действующая на индентор со стороны ткани; F_i — сила, действующая на индентор со стороны двигателя; θ — угол поворота ротора двигателя; I_A , I_B — токи, текущие в фазах A и B двигателя; V_A , V_B — управляющее напряжение, приложенное к фазам двигателя; L и R — индуктивность и сопротивление обмоток; κ — моментный коэффициент; χ — коэффициент вязкого трения; n — число зубцов ротора; r — радиус ротора.

Предположим, что вращение двигателя передается на индентор без проскальзывания:

$y_i = -r\theta$. Тогда, исключая F_i из первого и второго уравнений (3), получаем следующую систему:

$$\begin{aligned} -(J + m_i r^2) \ddot{y}_i &= -\kappa r I_A \sin n\theta + \\ &+ \kappa r I_B \cos n\theta + \chi r \dot{y}_i - N_i r^2; \\ L \dot{I}_A &= V_A - R I_A + \kappa \dot{\theta} \sin n\theta; \\ L \dot{I}_B &= V_B - R I_B + \kappa \dot{\theta} \cos n\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

Система (4) замкнута, если заданы управляющие напряжения и сила взаимодействия с тканью. Предположим, что трение и индуктивность в шаговом двигателе малы. Учитывая, что $-r\theta = y_i$, получим:

$$\begin{aligned} (J + m_i r^2) \ddot{y}_i &= \kappa r I_A \sin n\theta - \kappa r I_B \cos n\theta - N_i r^2; \\ R I_A &= V_A + \kappa \dot{\theta} \sin n\theta; \\ R I_B &= V_B + \kappa \dot{\theta} \cos n\theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Целью управляющих воздействий, прикладываемых к системе, является обеспечение выполнения следующих соотношений:

$$y_i = -r\theta = y_s; \quad N_i = \bar{F}.$$

Здесь $\bar{F}$ — среднее значение силы, создаваемой ПЭП (т. е. силы, обеспечивающей ощущение за некоторое характерное время T).

В процессе работы устройства сила N_i измеряется датчиком усилия (см. рис. 1). На основе этой информации блок управления формирует соответствующую частоту возбуждения ν .

Идентификация параметров модели ПЭП

Обозначим P^* такое значение вынуждающей силы, при котором ползун остается неподвижным при заданном значении частоты.

Для определения параметров системы воспользуемся данными, полученными в описанных выше экспериментах. При этом значение силы предварительного нагружения было равно 8 Н. Масса ползуна составляла 0,02 кг. Для коэффициента трения μ , следуя работе [12], было принято значение 0,3.

С помощью метода координатного спуска параметры системы были определены таким образом, чтобы расчетная зависимость P^* от частоты была как можно ближе к экспериментальной. При этом были получены следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} m_a &= 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ кг}; \quad k_x = 6,9 \cdot 10^7 \text{ Н/м}; \\ k_y &= 6,9 \cdot 10^7 \text{ Н/м}; \quad h_x = 25 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \\ h_y &= 5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \quad k_c = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \quad h_c = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \\ A_x &= 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad A_y = -0,97 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \end{aligned}$$

На рис. 2 представлена расчетная зависимость силы P^* от частоты ν возбуждения (ромбики). Черными кружками изображены экспериментальные данные. Видно, что расчетная зависимость достаточно близка к экспериментальным данным.

Особенности управления ПЭП

Сформируем алгоритм управления частотой возбуждения ПЭП в зависимости от силы N_i . При этом будем опираться на имеющиеся экспериментальные данные.

Эти данные охватывают ограниченный диапазон частот $\nu_1 \leq \nu \leq \nu_2$, на котором P^* монотонно убывает с ростом частоты. Введем следующие обозначения: $P^*(\nu_1) = P_{\max}$, $P^*(\nu_2) = P_{\min}$. Будем выбирать частоту ПЭП из этого диапазона таким образом, чтобы сила, соответствующая этой частоте, превышала значение $P_{\min}$ на величину, равную измеренному значению силы N_i . В случае, когда $N_i + P_{\min} \leq P_{\max}$, из известной экспериментальной зависимости $P^*(\nu)$ однозначно находится значение ν , принадлежащее требуемому диапазону. Если же $N_i + P_{\min} > P_{\max}$, то частота принимается равной ν_1 . При этом сила, развиваемая ПЭП, оказывается равной $P_{\max}$.

Численное моделирование

Пусть кнопка совершает возвратно-поступательное движение по гармоническому закону

$$y_s = y_{s0}(1 - \cos 2\pi t/T). \quad (6)$$

Будем моделировать ткань линейно-упругой пружиной: $N_i = -Ky_s$. Исследуем зависимость от

времени силы, ощущаемой пользователем, при разных значениях коэффициента жесткости K .

Отметим, что в рамках предложенного выше алгоритма управления максимальное значение K , для которого сила, измеряемая индентором, не превысит максимальную силу, которую может создать ПЭП, определяется формулой

$$K_{\max} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{y_{s\max}}.$$

Здесь $y_{s\max}$ — максимальное смещение кнопки (и, соответственно, индентора). Для закона движения (5) имеем $y_{s\max} = 2y_{s0}$. Для описанного устройства при выбранном законе движения кнопки $K_{\max} \approx 82$ Н/м.

Была проведена серия расчетов при $y_{s0} = 2$ мм, $T = 1$ с. Результаты расчетов представлены на рис. 4, 5. Точки обозначают расчетные значения силы P , сплошная кривая — величину $N_i + P_{\min}$ (т. е. целевое значение силы ощущения), а штриховая прямая — величину $P_{\min}$.

На рис. 4 представлены результаты для случая, когда коэффициент трения между ползуном и его направляющей равен 0,025. Видно, что в диапазоне $K < K_{\max}$ система обеспечивает ощущение, позволяя различить пружины с разной жесткостью по максимальному значению силы P , задаваемой формулой (2), и скорости ее роста.

Отметим, что уменьшение хода кнопки позволяет увеличить диапазон значений коэффициента жесткости, в котором возможно надежное ощущение.

Однако наличие трения между ползуном и направляющей приводит к тому, что ощущаемая сила отличается от реальной силы, измеряемой датчиком усилия на инденторе (рис. 5).

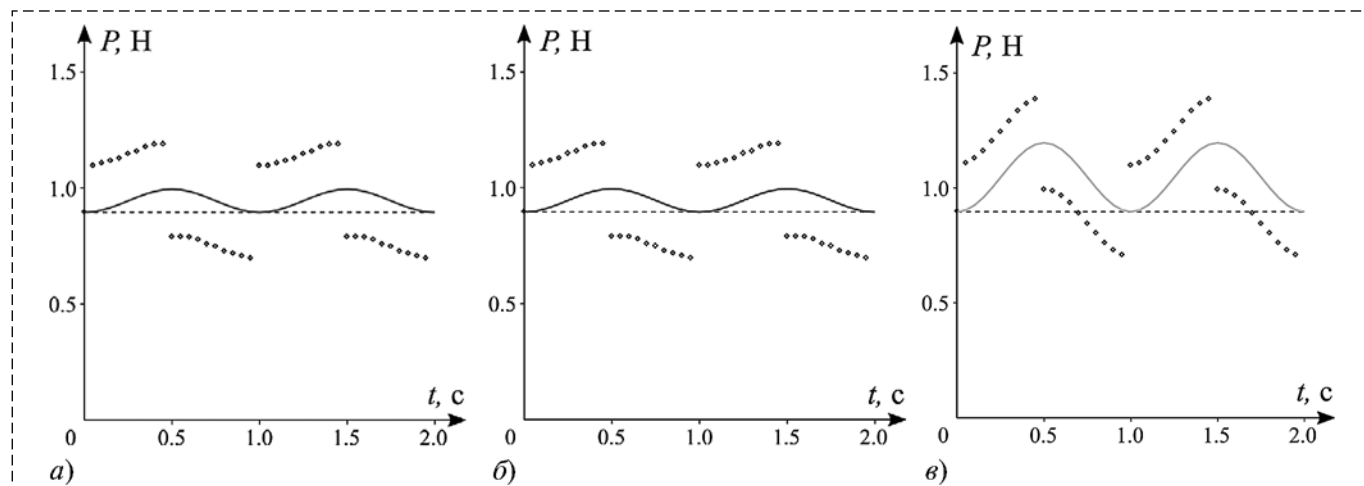


Рис. 4. Зависимость силы ощущения от жесткости пружины:

$a - K = 25$ Н/м, $f = 0,025$; $b - K = 50$ Н/м, $f = 0,025$; $v - K = 75$ Н/м, $f = 0,025$

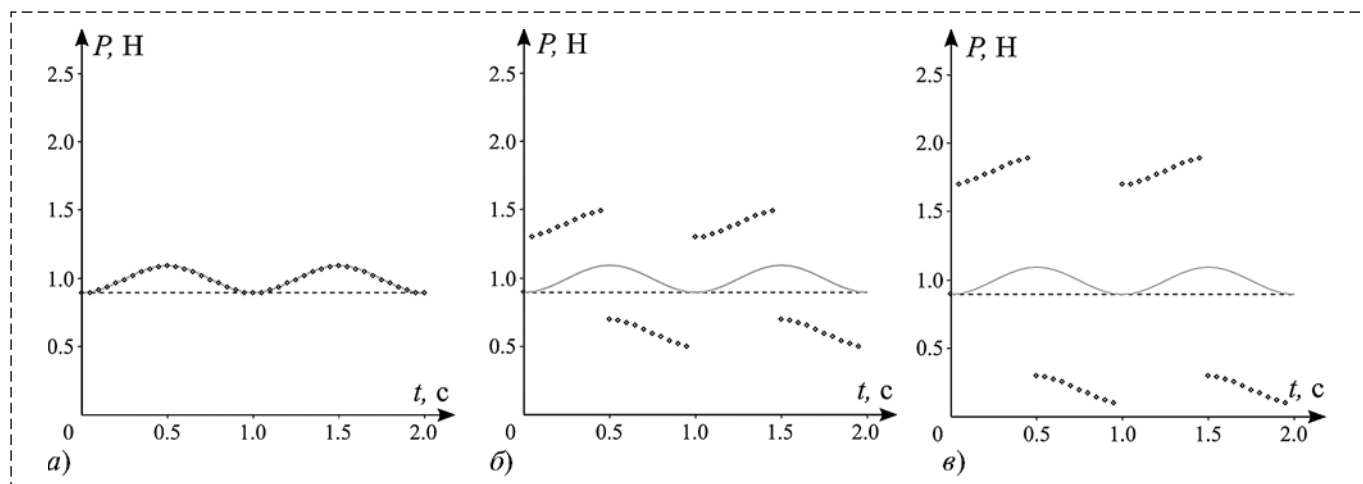


Рис. 5. Зависимость силы оцувствления от коэффициента трения между ползуном и направляющей:

а — $K = 50 \text{ Н/м}$, $f = 0$; б — $K = 50 \text{ Н/м}$, $f = 0,05$; в — $K = 50 \text{ Н/м}$, $f = 0,1$

Она больше целевых значений при опускании кнопки и меньше них при подъеме. В момент изменения направления движения кнопки оцувщаемая сила претерпевает разрыв.

Разницу между измеряемой и оцувщаемой силами в принципе можно уменьшить либо путем уменьшения трения в ползуне, либо путем уменьшения силы N предварительного нагружения ПЭП. Однако второй способ приведет к уменьшению силы F , действующей на ползун со стороны ПЭП, и, следовательно, к сужению диапазона усилий, в котором будет реализовываться оцувствление.

По-видимому, целесообразно идентифицировать коэффициент трения f и учитывать силу трения между ползуном и направляющей, чтобы парировать ее наличие, по крайней мере, на какой-то из фаз движения. Это приведет к сужению диапазона жесткостей, для которых возможно оцувствление, но зато даст пользователю более точную информацию о контактных усилиях, возникающих между индентором и тканью.

Выводы

Рассмотрена мехатронная система, реализующая тактильную обратную связь. Система состоит из мастер-манипулятора, блока управления и исполнительного устройства, оснащенного датчиком усилия. В качестве двигателя, создающего тактильное сопротивление, использован пьезоэлектрический привод. Для описания динамики системы построена конечномерная феноменологическая модель. Параметры ПЭП идентифицированы на основе экспериментальных данных. Показано, что

система позволяет различать объекты с различными характеристиками жесткости.

Список литературы

1. Steinberg P. L., Merguerian P. A., Bihle W. 3rd, Heaney J. A., Seigne J. D. A da Vinci robot system can make sense for a mature laparoscopic prostatectomy program // Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons. 2008. Vol. 12, Iss. 1. P. 9—12.
2. Hockstein N. G., Nolan J. P., O'Malley B. W. Jr., Woo Y. J. Robotic microlaryngeal surgery: a technical feasibility study using the daVinci surgical robot and an airway mannequin // The Laryngoscope. 2005. Vol. 115, Iss. 5. P. 780—785.
3. Tholey G., Desai J. P., Castellanos A. E. Force feedback plays a significant role in minimally invasive surgery: results and analysis // Annals of surgery. 2005. Vol. 241, Iss. 1. P. 102—109.
4. Perreault S., Talasaz A., Trejos A. L., Ward C. D. W., Patel R. V., Kiai B. A 7-DOF haptics-enabled teleoperated robotic system: Kinematic modeling and experimental verification // Proceedings of 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (26—29 Sept. 2010). 2000. P. 906—911.
5. Tiwana M. I., Redmond S. J., Lovell N. H. A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering // Sensors and Actuators A: Physical. 2012. Vol. 179, Suppl. C. P. 17—31.
6. WeiXing F., HuanRan W., ShuXiang G., KeJun W., XiuFen Y. Design and Experiments of a Catheter Side Wall Tactile Sensor for Minimum Invasive Surgery // Proceedings of 2007 International Conference on Mechatronics and Automation (5—8 Aug. 2007). 2007. P. 1073—1078.
7. Takashima K., Yoshinaka K., Okazaki T., Ikeuchi K. An endoscopic tactile sensor for low invasive surgery // Sensors and Actuators A: Physical. 2005. Vol. 119, Iss. 2. P. 372—383.
8. Hemsell T., Wallaschek J. Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors // Ultrasonics. 2000. Vol. 38, Iss. 1. P. 37—40.
9. Wurpts W., Twiefel J. An ultrasonic motor with intermittent contact modeled as a two degree of freedom oscillator in time domain // PAMM. 2009. Vol. 9. P. 287—288; doi: 10.1002/pamm.200910117.

10. **Mashimo T., Terashima K.** Dynamic analysis of an ultrasonic motor using point contact model // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015. Vol. 233. P. 15-21; doi: 10.1016/j.sna.2015.05.009.

11. **Peled G., Yasinov R., Karasikov N.** Performance and Applications of L1B2 Ultrasonic Motors // *Actuators*. 2016. Vol. 5, Iss. 2. P. 15.

12. **Liu Z., Yao Z., Li X., Fu Q.** Design and experiments of a linear piezoelectric motor driven by a single mode // *Review of Scientific Instruments*. 2016. Vol. 87 (11): 115001; doi: 10.1063/1.4966251.

Modeling Tactile Feedback Realized by Piezoelectrical Actuator

M. Z. Dosaev, dosayev@imec.msu.ru, **Yu.D. Selyutskiy**, seliutski@imec.msu.ru,

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russia

C.-H. Yeh, longerplus@gmail.com, **F.-C. Su**, fcsu@mail.ncku.edu.tw,

National Cheng Kung University, Tainan, 701, Taiwan

Corresponding author: **Dosaev Marat Z.**, Ph.D., Associate Professor,
Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,
e-mail: dosayev@imec.msu.ru

Accepted on January 23, 2018

Lack of the haptic feedback in the minimally invasive surgery often results in the increase of the complexity and duration of the surgical operation. This study aims at creation of a system that provides transmission of tactile sensation and consists of a master manipulator, control unit, and actuator equipped with a force sensor. The user pushes the button on the manipulator. The motion of this button is synchronized with the motion of the slave actuator that indents into the soft tissue. The load upon the indenter is measured by the force sensor and transmitted to the control unit. The control unit determines the operating frequency of a piezoelectric actuator in such a way that the actuator generates a force corresponding to the measured load. This force is applied to the button of the manipulator, and the user feels it. Thus, the system ensures the tactile feedback. Mathematical model of the system is created. In order to describe the dynamics of the actuator subsystem, a simplified empirical model is used. Parameters of the model are identified based on experimental data. Numerical simulation of dynamics of the system is performed using the determined values of parameters for the case when the button moves harmonically. Soft tissue is modeled by linear elastic springs with different stiffness coefficients. Influence of the dry friction between slider and its guide is analyzed. It is shown that the system ensures tactile sensing and allows distinguishing objects with different stiffness characteristics based on maximum value of the force experienced by the user from the part of the button and the rate of growth of this force.

Keywords: tactile sensing, piezoelectrical actuator, mathematical model, parameter identification, local stiffness, friction

For citation:

Dosaev M. Z., Selyutskiy Yu.D., Yeh C.-H., Su F.-C. Modeling Tactile Feedback Realized by Piezoelectrical Actuator, *Мехатроника, Автоматизация, Управление*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 480—485.

DOI: 10.17587/mau.19.480-485

References

1. **Steinberg P. L., Merguerian P. A., Bihle W.3rd, Heaney J. A., Seigne J. D.** A da Vinci robot system can make sense for a mature laparoscopic prostatectomy program, *Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons*. 2008. vol. 12, iss. 1, pp. 9—12.

2. **Hockstein N. G., Nolan J. P., O'Malley B. W. Jr., Woo Y. J.** Robotic microlaryngeal surgery: a technical feasibility study using the daVinci surgical robot and an airway mannequin, *The Laryngoscope*, 2005, vol. 115, iss. 5, pp. 780—785.

3. **Tholey G., Desai J. P., Castellanos A. E.** Force feedback plays a significant role in minimally invasive surgery: results and analysis, *Annals of Surgery*, 2005, vol. 241, iss. 1, pp. 102—109.

4. **Perreault S., Talasaz A., Trejos A. L., Ward C. D. W., Patel R. V., Kialii B.** A 7-DOF haptics-enabled teleoperated robotic system: Kinematic modeling and experimental verification, *Proceedings of 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics* (26—29 Sept. 2010), 2000, pp. 906—911.

5. **Tiwana M. I., Redmond S. J., Lovell N. H.** A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, vol. 179, suppl. C, pp. 17—31.

6. **WeiXing F., HuanRan W., ShuXiang G., KeJun W., XiuFen Y.** Design and Experiments of a Catheter Side Wall Tactile Sensor for Minimum Invasive Surgery, *Proceedings of 2007 International Conference on Mechatronics and Automation* (5—8 Aug. 2007), 2007, pp. 1073—1078.

7. **Takashima K., Yoshinaka K., Okazaki T., Ikeuchi K.** An endoscopic tactile sensor for low invasive surgery, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 119, iss. 2, pp. 372—383.

8. **Hemsel T., Wallaschek J.** Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors, *Ultrasonics*, 2000, vol. 38, iss. 1, pp. 37—40.

9. **Wurpts W., Twiefel J.** An ultrasonic motor with intermittent contact modeled as a two degree of freedom oscillator in time domain, *PAM*, 2009, vol. 9, pp. 287—288; doi: 10.1002/pamm.200910117.

10. **Mashimo T., Terashima K.** Dynamic analysis of an ultrasonic motor using point contact model, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, vol. 233, pp. 15—21; doi: 10.1016/j.sna.2015.05.009.

11. **Peled G., Yasinov R., Karasikov N.** Performance and Applications of L1B2 Ultra-sonic Motors, *Actuators*, 2016, vol. 5, iss. 2, pp. 15.

12. **Liu Z., Yao Z., Li X., Fu Q.** Design and experiments of a linear piezoelectric motor driven by a single mode, *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87 (11): 115001; doi: 10.1063/1.4966251.

А. Ю. Ивойлов, аспирант, iau13hv@mail.ru, В. А. Жмудь, д-р техн. наук, доц.,
В. Г. Трубин, ст. преподаватель,
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Методика определения параметров двигателя постоянного тока

Рассматривается методика получения математической модели двигателя постоянного тока. Несмотря на то, что классическая математическая модель широко известна и хорошо изучена, нередко возникает необходимость ее уточнения и определения ее параметров экспериментальным путем. В технической документации не всегда могут быть указаны все интересующие параметры двигателя, иногда о двигателе может не быть вообще никакой информации. К тому же на практике в реальном двигателе могут присутствовать особенности, которые не учитывает классическая модель. В начале статьи рассматривается традиционная модель двигателя, его статические и динамические характеристики. Выявляются параметры модели, которые необходимо определить экспериментально. Далее проводится анализ особенностей, которые отличают поведение реального двигателя от поведения, предсказываемого моделью. К таким особенностям можно отнести работу коллекторного узла привода, особенности его геометрии и влияние редуктора. Путем проведения различных экспериментов изучается влияние этих особенностей на работу двигателя и определяются условия, при которых следует получать параметры его модели. Далее на основе проведенного анализа предлагается методика получения математической модели. В основе методики лежит экспериментальное определение соотношений тока и крутящего момента с одной стороны, и приложенного напряжения и скорости вращения — с другой стороны. При этом методика учитывает влияние трения вала двигателя, которое возрастает при наличии нагрузки на нем. Предлагается способ компенсации этого эффекта для исключения его влияния на результат определения математической модели. Далее приводится пример применения описанной методики для определения параметров модели сервопривода Lego NXT Motor. Представлены численные значения параметров и графические данные. В завершение проводится сравнение поведения реального двигателя и поведения, рассчитанного по модели, полученной ранее. В качестве демонстрационной системы используется система автоматического управления углом поворота вала двигателя на основе пропорционального регулятора.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, системы автоматического управления, математическая модель, экспериментальное определение характеристик, особенности модели

Введение

В настоящее время широкое применение во многих областях автоматики находят различные типы электроприводов постоянного тока. Примером могут служить роботизированные устройства или лабораторные стенды, в которых они применяются в качестве исполнительных механизмов. В большинстве случаев для разработки системы автоматического управления объектом необходима математическая модель привода. Степень ее точности и необходимость учета различных эффектов зависит от конкретной задачи. Однако на практике не всегда доступна информация обо всех интересующих параметрах электродвигателя. Нередко в технической документации приводятся лишь основные параметры привода, такие как номинальное напряжение, момент и частота вращения. При этом, например, данные об активном сопротивлении обмоток и их индуктивности, моменте инерции вала двигателя могут отсутствовать. Это обстоятельство

может быть существенным, поскольку данные параметры определяют динамические свойства двигателя и, следовательно, могут иметь большое значение при проектировании системы автоматического управления. Особенно остро эта проблема проявляется при проектировании прототипов устройств, когда в качестве привода может применяться двигатель, который есть в наличии и о котором неизвестно вообще ничего. В связи с этим возникает задача определения параметров двигателя, необходимых для получения его математической модели.

Математическая модель двигателя постоянного тока в настоящее время хорошо изучена и описана во многих работах, например, в [1, 2]. В работе [3] приводится способ получения уравнений математической модели двигателя при проектировании системы автоматического управления. Кроме того, реальный привод может обладать рядом особенностей, таких как наличие редуктора, особенности работы коллекторного узла и др., усложняющих его мо-

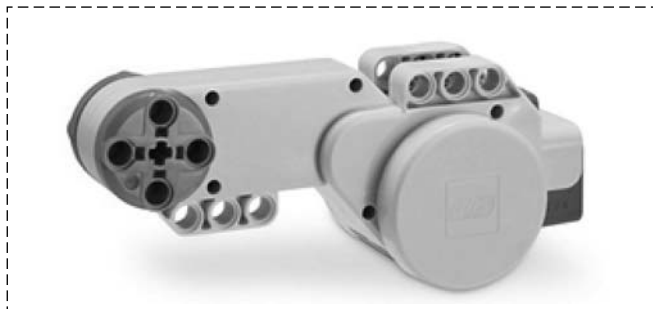


Рис. 1. Двигатель Lego NXT Motor

дель. Эти особенности могут оказывать существенное влияние на работу конечной системы и потому должны быть учтены. В данной работе рассмотрена методика определения параметров математической модели двигателя постоянного тока (ДПТ) с учетом наличия особенностей, встречающихся в реальных устройствах, проведена оценка степени линейности модели. В качестве примера в статье рассматривается сервопривод *NXT Lego Motor* (рис. 1). Это устройство представляет собой электропривод постоянного тока с постоянными магнитами. В сервопривод встроены редуктор и квадратный энкодер, который имеет 360 отсчетов на период и значительно упрощает оценку угла и скорости вращения вала.

Классическая модель двигателя постоянного тока

В данном разделе приведены теоретические соотношения, описывающие поведение двигателя постоянного тока. Классическая модель ДПТ включает следующие уравнения:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + E; \quad (1)$$

$$E = K_e \omega; \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_L - M_f; \quad (3)$$

$$M_m = K_T i. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены параметры модели ДПТ, их физический смысл и единицы измерений. Отметим также, что в общем случае момент трения двигателя M_f включает статический момент, определяемый внутренним трением

Параметры модели ДПТ

Обозначение	Физический смысл	Единица
U	Напряжение на обмотках двигателя	В
E	ПротивоЭДС	В
i	Ток в обмотках двигателя	А
ω	Скорость вращения вала двигателя	рад·с ⁻¹
M_m	Крутящий момент двигателя	Н·м
M_L	Момент нагрузки на валу двигателя	Н·м
M_f	Момент трения	Н·м
L	Индуктивность обмоток двигателя	Гн
R	Сопротивление обмоток двигателя	Ом
J	Момент инерции вала двигателя	кг·м ²
K_e	Коэффициент передачи скорости	В·с·рад ⁻¹
K_T	Коэффициент передачи тока	Н·м·А ⁻¹

ротора и элементов редуктора, и дополнительный момент сухого трения, создаваемый внешней нагрузкой на валу. Значение этого момента определяется нагрузкой, свойствами вала и редуктора двигателя, а также конструкцией устройства, в котором применяется ДПТ. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Статические свойства ДПТ (т. е. свойства в установившемся режиме) определяются параметрами K_T , K_e и R . Уравнение, описывающее поведение ДПТ в установившемся режиме, выводится из основных соотношений при условии $\frac{d\omega}{dt} = 0$ и $\frac{di}{dt} = 0$:

$$\omega = \frac{1}{K_e} U - \frac{R}{K_T K_e} (M_L + M_f). \quad (5)$$

Данное соотношение описывает семейство механических характеристик ДПТ. Динамические свойства ДПТ (постоянные времени переходного процесса) определяются величинами L и J . Следует отметить, что величина J включает не только момент инерции вала ДПТ, но и момент инерции нагрузки, и этот факт необходимо учитывать. Для описания динамики поведения ДПТ выведем передаточную функцию из соотношений (1)–(4), подставив выражение (2) в уравнение (1) и выражение (4) в уравнение (3), принимая $M_L = 0$ и $M_f = 0$:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + K_e \omega; \quad (6)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_T i. \quad (7)$$

Подставляя оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$ в уравнения (6)–(7), после чего подставляя (7) в (6), получим

$$U = \left(\frac{LJ}{K_T} p^2 + \frac{RJ}{K_T} p + K_e \right) \omega,$$

откуда

$$W(p) = \frac{\omega}{U} = \frac{1/K_e}{p^2 T_3 T_M + p T_M + 1}, \quad (8)$$

где

$$T_3 = \frac{L}{R}; T_M = \frac{RJ}{K_T K_e}.$$

Для ДПТ, как правило, $T_3 \ll T_M$. В этом случае выражение (8) можно преобразовать к следующему виду:

$$W(p) = \frac{\omega}{U} = \frac{1/K_e}{(T_3 p + 1)(T_M p + 1)}.$$

При этом переходный процесс имеет ярко выраженные быструю и медленную составляющие, каждой из которых соответствует своя постоянная времени (T_3 и T_M соответственно). Это свойство можно использовать для вычисления значений данных величин.

Анализ особенностей двигателя

Для выбора способа определения параметров ДПТ и корректного проведения опыта необходимо рассмотреть некоторые особенности ДПТ, которые не учитывает классическая модель. К таким особенностям можно отнести следующие:

- работу коллекторного узла;
- геометрию ДПТ;
- наличие редуктора.

Подробно особенности геометрии ДПТ и работы коллекторного узла рассмотрены в работах [4, 5].

Исследуемый двигатель *Lego NXT Motor*, как было сказано выше, представляет собой ДПТ с постоянными магнитами. На рис. 2 представлены переходные процессы силы тока на холостом ходу. Графики силы тока соответствуют различным уровням эквивалентного напряжения, приложенного к обмоткам двигателя. Значение эквивалентного напряжения

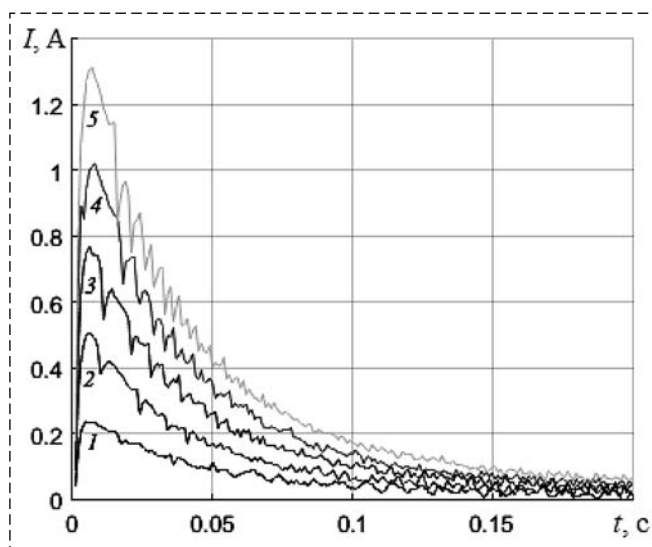


Рис. 2. Переходные процессы тока при различных уровнях скважности ШИМ:

1 — 15 %; 2 — 30 %; 3 — 45 %; 4 — 60 %; 5 — 75 %

задавалось с помощью ШИМ с определенными значениями скважности. Из рис. 2 видно, что сила тока пульсирует, при этом период пульсаций пропорционален скорости вращения вала двигателя. Возникновение пульсаций связано с работой коллекторного узла (коммутацией обмоток) и геометрией ДПТ (расположение магнитов и щеток). В первом приближении для определения момента, создаваемого ДПТ (из соотношения (4) следует, что он пропорционален току), можно использовать средние за период пульсации значения силы тока.

С геометрией ДПТ связан еще один эффект. Он проявляется в следующем: при одинаковой нагрузке на валу и различных значениях напряжения на обмотках якоря сила тока в обмотках имеет большее значение, если ротор неподвижен, чем в случае, если он вращается. Рис. 3 иллюстрирует этот эффект. На рис. 3 представлены графики силы тока двигателя при различных значениях скважности напряжения и одинаковой нагрузке. При наименьшем напряжении U_1 ротор неподвижен: $\omega_1 = 0$. При напряжениях $U_2 > U_1$ и $U_3 > U_2$ ротор вращается с частотами $\omega_2 > 0$ и $\omega_3 > \omega_2$ соответственно. При этом сила тока при напряжении U_1 (когда ротор неподвижен) выше, чем при напряжениях U_2 и U_3 . Таким образом, поведение реального двигателя не вполне соответствует классической модели. Такая особенность ДПТ связана, с одной стороны, с его геометрией,

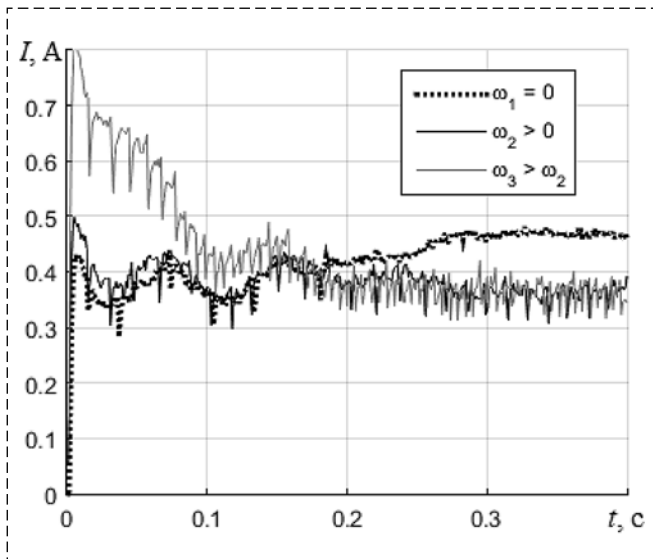


Рис. 3. Ток двигателя при неподвижном и вращающемся вале при одинаковой величине нагрузки

а с другой — с тем, что сила трения покоя выше, чем сила трения скольжения. Геометрия ДПТ такова, что магнитный поток распределен неравномерно. Данное свойство проявляется также в наличии устойчивых положений у вала мотора при отсутствии напряжения. Наличие данного эффекта приводит к тому, что для определения параметров ДПТ не вполне корректно использовать опыты, в которых вал двигателя неподвижен (например, измерение давления на опору через рычаг). Кроме того, из-за коммутации обмоток в коллекторном узле, их эквивалентное активное сопротивление также меняется на протяжении периода вращения, поскольку в разные моменты времени может быть подключено разное число обмоток и в разных конфигурациях. Из этого следует, что сопротивление обмоток мотора также правильнее определять в процессе вращения вала.

В исследуемый двигатель встроен редуктор, который имеет колебательные свойства, подобные свойствам крутильной пружины. Для демонстрации этого свойства был проведен следующий опыт. На обмотки двигателя подавалось напряжение различной величины, при этом вал редуктора был зафиксирован. На рис. 4 приведены переходные процессы силы тока. Из рис. 4 видно, что на начальном этапе вал мотора приходит во вращение, однако далее под действием нарастающей силы упругости постепенно останавливается. Для ис-

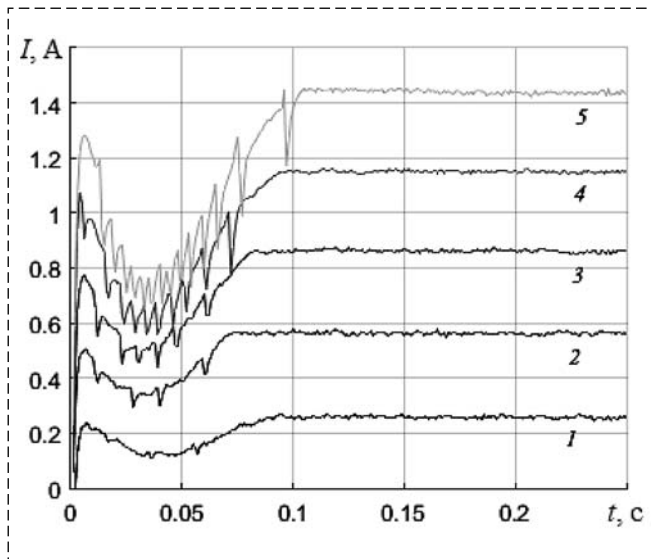


Рис. 4. Амортизирующие свойства редуктора. Кривые тока соответствуют значениям скважности ШИМ:

1 — 15 %; 2 — 30 %; 3 — 45 %; 4 — 60 %; 5 — 75 %

ключения влияния этого эффекта на результат определения параметров ДПТ необходимо исключить колебания редуктора. Один из способов состоит в том, чтобы прикладывать к обмоткам постепенно нарастающее напряжение. Это приведет к тому, что сила тока, а значит и момент, будут нарастать постепенно, что снизит величину возможных колебаний. Второй способ заключается в том, что после приложения напряжения необходимо дождаться полного затухания колебаний, после чего проводить измерения.

Редуктор также имеет еще одно свойство — свободный ход, или люфт. Он может оказывать существенное влияние на поведение нагрузки. Однако при проведении опыта по оценке параметров двигателя влияние данного эффекта легко исключить. Для этого достаточно в ходе опыта вращать вал мотора в лишь одном направлении и не менять его на противоположное.

Таким образом, для того, чтобы при оценке параметров двигателя исключить влияние на результат измерений особенностей, описанных выше, необходимо выполнить следующие условия:

- при проведении опыта необходимо, чтобы вал двигателя находился во вращении;
- при расчетах использовать средние за период пульсации силы тока значения;
- измерять значения величин после затухания колебаний в редукторе.

Описание методики определения параметров двигателя

Для решения поставленной задачи был выбран следующий способ определения параметров ДПТ. На валу мотора размещается катушка, на которую при вращении наматывается нить. На конце нити закрепляются грузы различной массы. В ходе опыта измеряются сила тока через обмотки двигателя и скорость вращения его вала при различных значениях напряжения на обмотках и массы груза. Схема опыта представлена на рис. 5. При выбранном способе проведения опыта следует учитывать влияние момента трения M_f . В данном случае значение момента трения зависит не только от свойств двигателя, но и от нагрузки, приложенной к валу. Связано это с тем, что катушка с грузом образует рычаг, через который передается воздействие силы тяжести груза, что приводит к появлению *дополнительного* момента трения M_f . Рис. 5, б иллюстрирует это свойство.

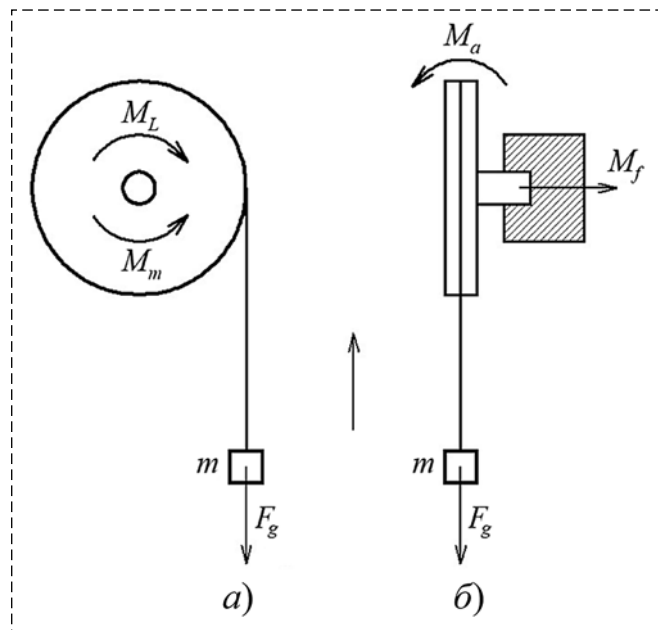


Рис. 5. Схема опыта (а); схема возникновения дополнительного момента трения (б). Здесь M_m — момент, развиваемый двигателем; M_L — момент нагрузки; M_a — дополнительный момент нагрузки; M_f — дополнительный момент трения

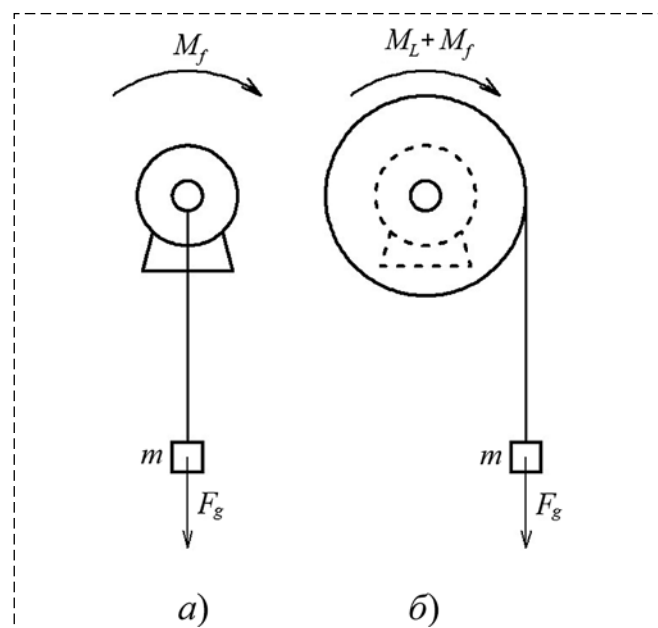


Рис. 6. Схема опыта по измерению момента трения (а); схема основного опыта (б)

Таким образом, к статическому моменту двигателя M_s , создаваемому внутренним трением двигателя, добавляется момент сухого трения, пропорциональный дополнительному моменту M_a , а соотношение для полного момента трения выглядит следующим образом:

$$M_f = M_s + K_f M_a,$$

где K_f — коэффициент трения.

Для корректного определения параметров модели двигателя в общем случае требуется вносить поправку на момент трения. Это необходимо сделать, поскольку неизвестны коэффициент трения и статический момент, а значит, неизвестен полный момент, приложенный к валу двигателя. Следовательно, коэффициент передачи тока K_T может быть определен неверно (см. выражение (4)).

Для корректного определения параметров двигателя предлагается провести два опыта (рис. 6). В первом опыте груз размещается не на конце нити, а в точке крепления катушки, при этом на вал действует только момент трения. Измеряется ток в установившемся режиме, который пропорционален только моменту трения:

$$i_f = \frac{M_f}{K_T}.$$

Во втором опыте груз размещается на конце нити, на вал действуют и момент трения, и момент нагрузки. Измеряются сила тока и скорость вращения вала в установившемся режиме. При этом сила тока пропорциональна сумме момента трения и момента нагрузки:

$$i_m = \frac{M_f + M_L}{K_T}.$$

Далее вычисляется разность сил токов, в результате чего определяется сила тока, пропорциональная только моменту нагрузки:

$$i_L = i_m - i_f = \frac{M_L}{K_T}.$$

Поскольку момент нагрузки известен, коэффициент K_T будет определен корректно. После этого, зная значение параметра K_T , можно определить момент трения, на основе которого далее вычислить статический момент и коэффициент трения.

С учетом всего вышесказанного предлагается следующая процедура определения параметров модели.

1. Выполнить опыт 1, измерив силу тока i_f при фиксированных значениях напряжения на обмотках и момента нагрузки.

2. Выполнить опыт 2, измерив силу тока i_m и скорости вращения вала ω при фиксированных значениях напряжения на обмотках и момента нагрузки.

3. Вычислить силу тока, пропорциональную только моменту нагрузки: $i_L = i_m - i_f$.

4. Определить параметр K_T с помощью аппроксимации зависимости момента нагрузки от тока $M_L(i_L) = K_T i_L$ при фиксированном значении напряжения.

5. Вычислить параметры M_s и K_f с помощью аппроксимации зависимости дополнительного момента от момента трения $M_f(M_a) = M_s + K_f M_a$. При этом момент трения вычислить

через значения силы тока и коэффициента тока: $M_f = K_T i_f$.

6. Определить параметр K_e на основе зависимости скорости вращения вала от напряжения $U(\omega) = K_e \omega$ при фиксированном значении момента нагрузки.

7. Определить сопротивление обмоток мотора из уравнения (5): $R = (U - K_e \omega) K_T / i_m$.

8. Определить значения L и J с помощью аппроксимации суммой экспонент зависимости $i(t)$ на холостом ходу.

В следующем разделе приведены результаты опыта, проведенного по описанной методике.

Результат определения параметров

В соответствии с описанной выше методикой были проведены два опыта, по результатам которых определены параметры двигателя. В ходе опыта силу тока измеряли с помощью датчика тока, основанного на эффекте Холла, а значение скорости в установившемся режиме определяли с помощью встроенного в двигатель квадратурного энкодера путем измерения угла поворота вала за заданный промежуток времени. Регулирование напряжения проводили с помощью ШИМ на частоте 10 кГц. При такой частоте пульсации тока от ШИМ много меньше, чем пульсации от работы коллектора мотора, и регулирование эквивалентно управлению уровнем напряжения (рис. 7).

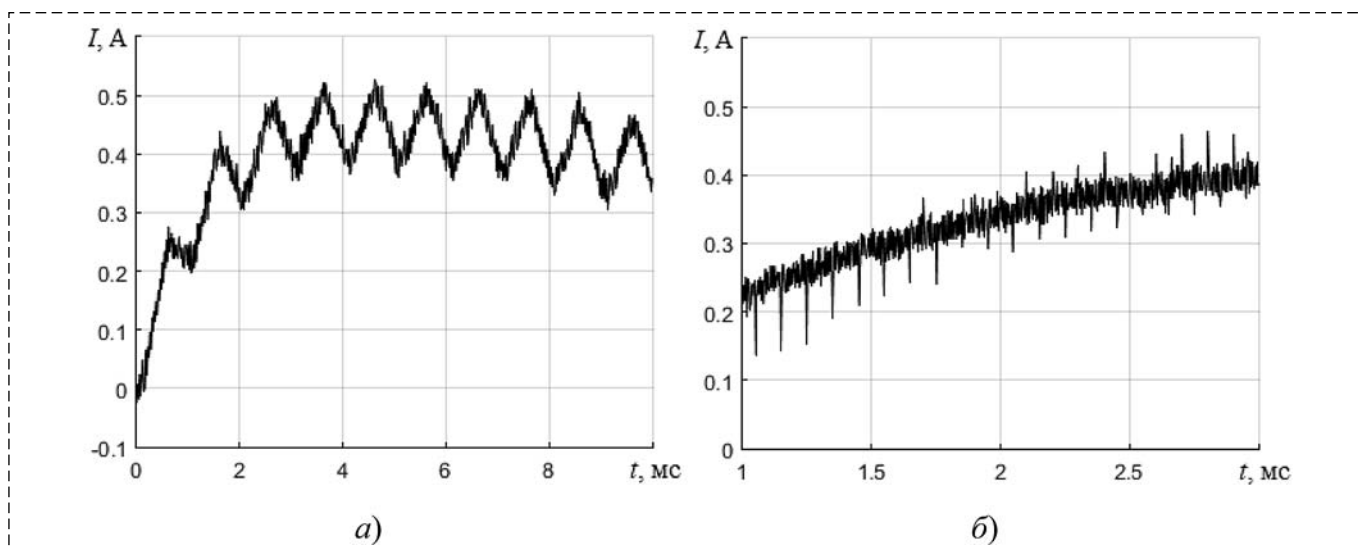


Рис. 7. Осциллограммы тока при использовании ШИМ:

a — при частоте 1 кГц; *б* — при частоте 10 кГц

Для проведения опытов были выбраны 5 точек фиксированного напряжения и 13 точек фиксированного момента нагрузки. Данные точки приведены в табл. 2 и 3. При этом отбрасывались точки, в которых вал мотора не вращался из-за большой нагрузки, для того чтобы данные не были искажены из-за эффекта, описанного в разделе 2 (см. рис. 3). Полученные данные были обработаны с помощью пакета MATLAB. Результаты представлены на рис. 8—17. В табл. 4 приведены вычисленные значения параметров двигателя.

Таблица 2

Точки напряжения

Скважность	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75
Эквивалентное напряжение, В	1,35	2,70	4,05	5,40	6,75

Таблица 3

Точки момента нагрузки

Масса, г	Момент нагрузки M_L , Н·см	Дополнительный момент M_a , Н·см
0	0	5,61
45	2,51	7,37
91	5,08	9,17
136	7,60	10,93
186	10,39	12,90
231	12,90	14,66
277	15,47	16,46
322	17,99	18,23
371	20,72	20,15
416	23,24	21,91
462	25,81	23,72
507	28,32	25,48
556	31,06	27,40

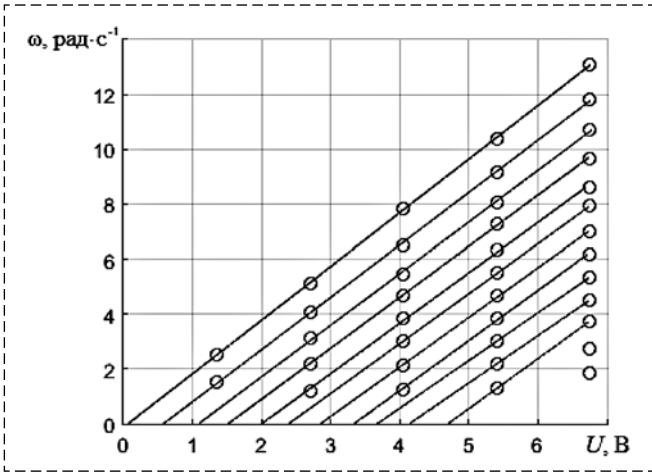


Рис. 8. Статические характеристики ДПТ: зависимость скорости от напряжения

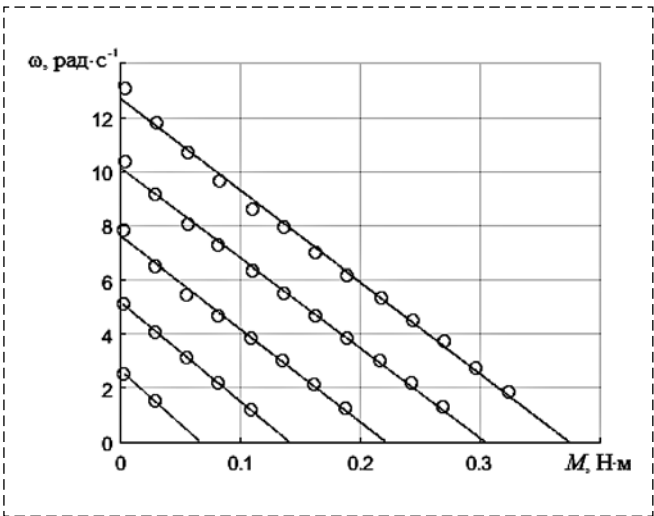


Рис. 9. Статические характеристики ДПТ: зависимость скорости от момента

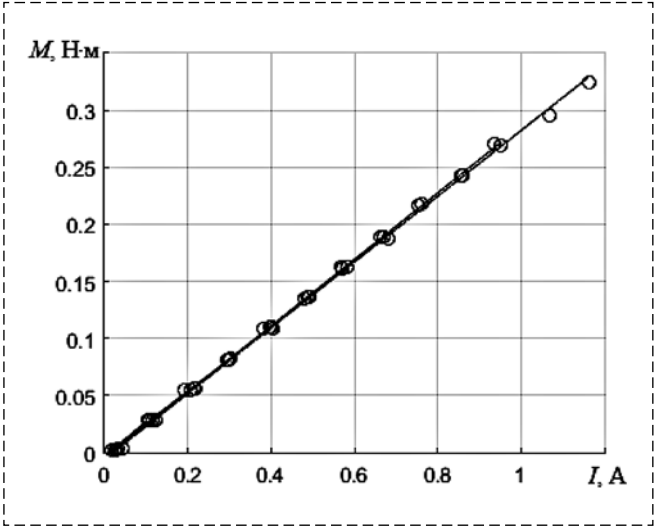


Рис. 10. Зависимость момента от силы тока

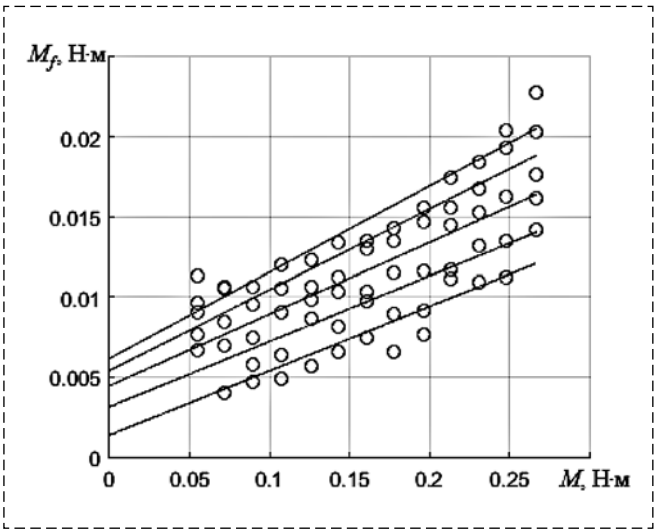


Рис. 11. Зависимость момента трения от дополнительного момента

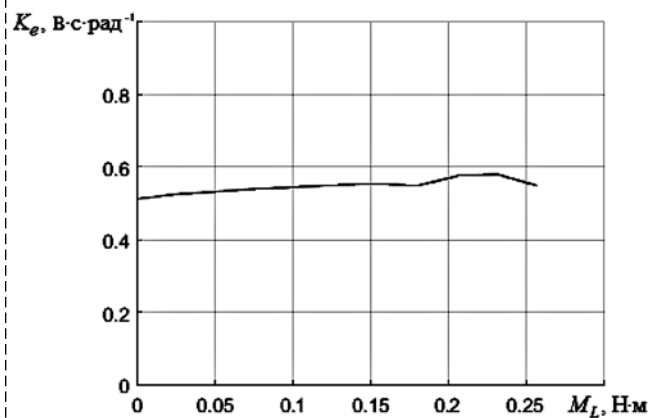


Рис. 12. Коэффициент скорости

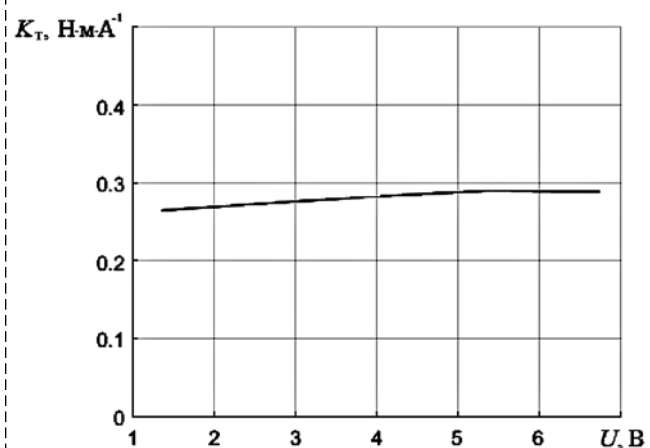


Рис. 13. Коэффициент тока

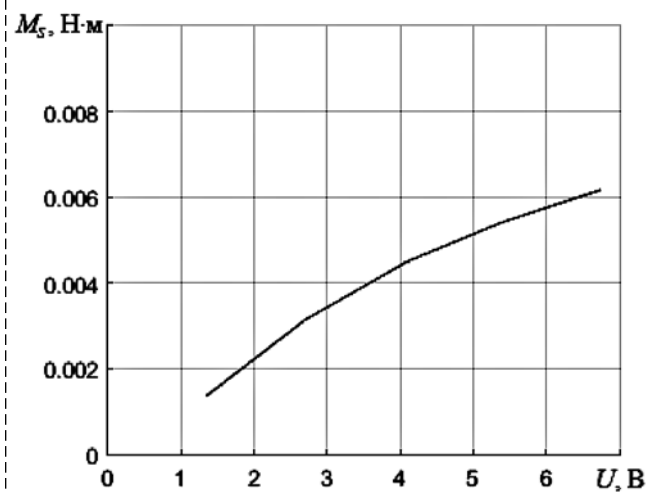


Рис. 14. Статический момент

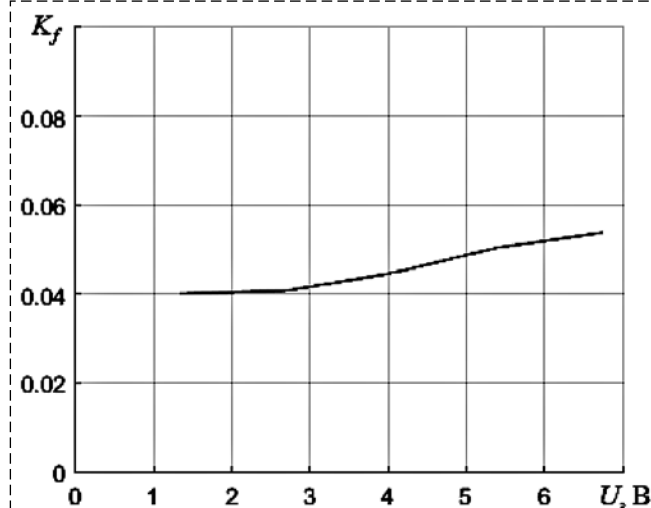


Рис. 15. Коэффициент трения

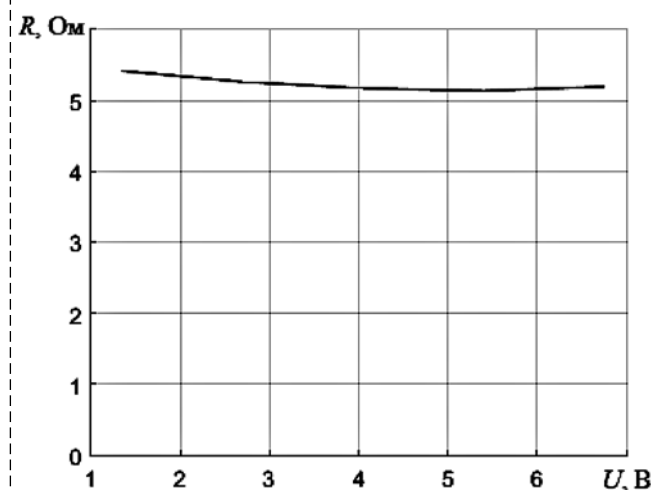


Рис. 16. Сопротивление обмоток мотора

Таблица 4

Значения параметров двигателя

Обозначение	Физический смысл	Значение	Единица
K_f	Коэффициент трения	0,046	Безразмерный
M_s	Статический момент трения	0,4	Н·см
L	Индуктивность обмоток	8	мГн
R	Сопротивление обмоток	5,2	Ом
J	Момент инерции вала	1,5	г·м ²
K_e	Коэффициент передачи скорости	0,55	В·с·рад ⁻¹
K_T	Коэффициент передачи тока	0,28	Н·м·А ⁻¹

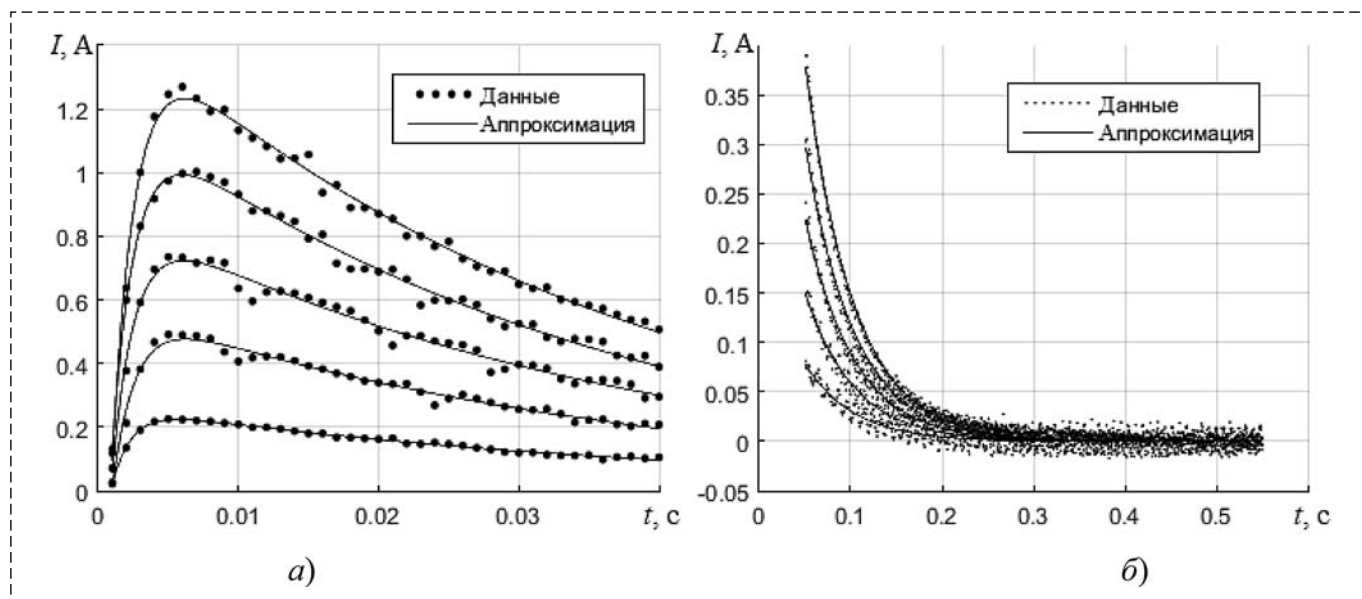


Рис. 17. Аппроксимация переходного процесса тока для получения значений его постоянных времени:

а — электромагнитная постоянная времени (быстрый процесс); б — механическая постоянная времени (медленный процесс). Кривые тока были смещены на величину среднего установившегося значения (к нулевому уровню) для корректной обработки данных

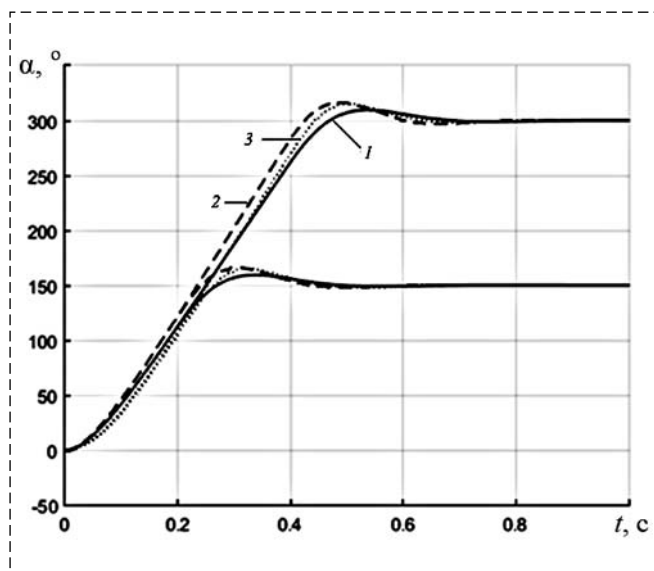


Рис. 18. Результат проверки модели:

1 — результат моделирования; 2 — переходный процесс при старте вращения из положения, когда механический зазор не пройден; 3 — переходный процесс при старте вращения из положения, когда зазор пройден

Численное моделирование

Для оценки точности полученных параметров модели был написан программный модуль, реализующий простейший пропорциональный регулятор. На рис. 18 представлен результат работы системы и результат моделирования. Схема моделирования системы приведена на рис. 19. Как видно из рис. 18, кривая, полученная при моделировании, имеет отличие от кривой реального устройства. С одной стороны, это связано с тем, что модель не учитывает наличие механического зазора в редукторе. Из рис. 18 видно, что при старте двигателя из двух крайних положений, когда зазор еще не пройден и когда зазор пройден, переходные процессы отличаются. С другой стороны, параметры системы имеют некоторую нелинейность, что также искажает реальную характеристику. Тем не менее, в данном случае

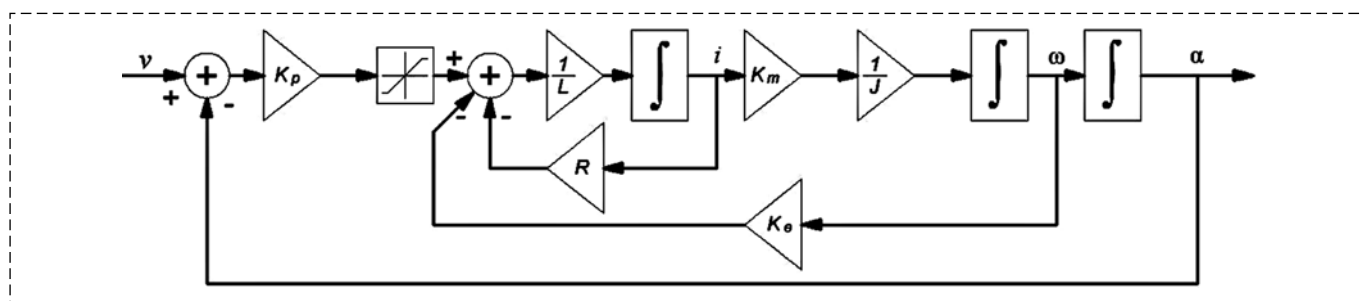


Рис. 19. Схема моделирования системы. Параметры взяты из табл. 4. Значение коэффициента регулятора принято $K_p = 8$

отличие модели и реального привода количественное, но не качественное.

Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Математическая модель реального ДПТ имеет существенные отличия от линейной модели, связанные с особенностями его конструкции. Отдельный вклад вносит редуктор, если он применяется. Это проявляется в наличии следующих эффектов:

- пульсация тока в обмотках ДПТ вследствие работы коллектора;
- наличие механического зазора;
- появление колебательных свойств.

2. Для корректной оценки значений статических характеристик ДПТ необходимо, чтобы в процессе измерения выполнялись следующие условия:

- при проведении опыта необходимо, чтобы вал двигателя находился во вращении;
- при расчетах нужно использовать средние за период пульсации тока значения;
- измерять значения величин нужно после затухания колебаний в редукторе.

3. Нагрузка на валу ДПТ помимо непосредственно нагрузочного момента создает также дополнительный момент трения, что также необходимо учитывать.

На основании этого предложена методика проведения опыта по оценке параметров математической модели ДПТ.

Проведение опыта показывает, что механические характеристики реального ДПТ также имеют отличия от линейных. Переходный процесс демонстрационной системы управления положением вала с применением пропорционального регулятора имеет количественные отличия от процесса, полученного при моделировании системы. Из этого можно сделать следующие выводы:

1) при использовании ДПТ для управления объектом с нелинейной моделью влияние особенностей модели ДПТ может стать существенным;

2) регулятор системы управления должен быть робастным, поскольку отклонение модели ДПТ от линейной может меняться от одного двигателя к другому, а также и во времени.

Список литературы

1. Кулик Ю. А. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1966. 362 с.
2. Усольцев А. А. Электрические машины: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 416 с.
3. Востриков А. С., Французова Г. А., Гаврилов Е. Б. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 476 с.
4. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
5. Кислицын А. Л. Электрические машины постоянного тока. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 122 с.

The Technique of the Direct Current Motor Parameters Determination

A. Yu. Ivoilov, iau13hv@mail.ru, V. A. Zhmud, oao_nips@bk.ru, V. G. Trubin, trubin@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Corresponding authors: Zhmud Vadim A., D. Sc. (Eng), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Accepted on April 06, 2018

The technique of the direct current motor math model obtaining is considered in this article. Despite the fact that the classical math model is widely known and well studied it often becomes necessary to refine and determine its parameters by experiment. The technical documentation may not specify all motor parameter of interest. Sometimes there is no information about the motor at all. In addition the features that the classical model does not take into account can be presented in a real motor in practice. At the beginning of the paper the traditional model of the motor is under consideration as well as its static and dynamic characteristics. The model parameters to be determined are brought out. Further the analysis of the features that distinguish the behavior of the real motor from the behavior predicted by the model is carried out. These features are commutator operation, the geometry of the motor, and the reducer action on system. The influence of these features on the motor operation is researched by the different experiments and the conditions under which the parameters of motor model should be obtained are determined. Further the technique of math model obtaining based on the analysis done is carried out. The method is based on the experimental determination of current and torque ratio on the one hand and the applied voltage and rotation speed on the other hand. Wherein the technique takes into account the effect of motor shaft friction which is increasing when there is a load on it. The method for compensating this effect to exclude its influence on the math model determining result is proposed. An example of application of the described technique to determining model of Lego NXT servo motor is given further. The numerical values of the parameters and the graphical data are presented. Finally, the behavior of the real motor and the behavior calculated from the model obtained earlier are compared. As a demonstration system, the automatic control system of the motor shaft rotation angle based on the proportional controller is used.

Keywords: DC motor, automatic control systems, math model, experimental parameters obtaining, model features

For citation:

Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A., Trubin V. G. The Technique of the Direct Current Motor Parameters Determination, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol.19, no. 7, pp. 486—496.

DOI: 10.17587/mau.19.486-496

References

1. Kulik Ju. A. *Jelektricheskie mashiny* (Electric machines), Moscow, Vysshaja shkola, 1966, 362 p. (in Russian).
2. Usol'tsev A. A. *Jelektricheskie mashiny* (Electric machines), St.Petersburg, NIU ITMO 2013, 416 p. (in Russian).

3. Vostrikov A. S., Francuzova G. A., Gavrilov E. B. *Osnovy teorii nepreryvnyh i diskretnykh sistem regulirovaniya* (Principles of the theory of continuous and discrete control systems), Novosibirsk, Publishing house of NGTU, 2008, 476 p. (in Russian).

4. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Jelektricheskie mashiny. Vvedenie v jelectromekhaniku. Mashiny postojannogo toka i transformatory* (Electric machines. Introduction to electrical engineering. DC electric machines and transformers), St.Petersburg, Piter, 2008, 320 p. (in Russian).

5. Kislicyn A. L. *Jelektricheskie mashiny postojannogo toka* (Direct current electric machines), Ul'janovsk, UIGTU, 2005, 122 p. (in Russian).



08—12 октября, 2018 г.
Волгоград, Волгоградский государственный
технический университет

VI Международная научно-практическая конференция «Прогресс транспортных средств и систем — 2018»

Во время конференции состоится заседание научного совета РАН по робототехнике и мехатронике и отчетное мероприятие РФФИ по конкурсу «офи-м»: тема 604 «Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов».

Конференция, в работе которой примут участие ведущие российские и зарубежные ученые и инженеры, ставит целью расширить научные контакты между специалистами, работающими в области транспортных средств и систем, а также обеспечить обмен научно-техническими достижениями между специалистами разных стран.

Направления работы конференции

- Беспилотные транспортные средства
- Перспективы создания транспортных средств на альтернативных источниках энергии
- Конструкции перспективных робототехнических и специальных транспортно-технологических средств
- Вопросы управления движением и эксплуатации робототехнических и специальных транспортно-технологических средств
- Системы коммуникации автомобилей, инфраструктуры и человека
- Системы моделирования дорожной обстановки и движения автомобиля
- Организация и управление перевозок на транспорте
- Интеллектуальные системы управления движением сложных объектов в недетерминированной среде
- Разработка транспортной инфраструктуры
- Обеспечение комплексной безопасности на транспорте

Подробную информацию о конференции см. сайте:

http://www.icpvs.ru/ru/about_ru/

Тел.: + 7 8442 24 81 14, e-mail: icpvs2018@vstu.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5510, (499) 269-5397

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Н. В. Яшина.

Сдано в набор 26.04.2017. Подписано в печать 18.06.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН718. 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 "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Рисунки к статье М. З. Досаева, Ю. Д. Селюцкого, Ч. С. Е, Ф. Ч. Су
«МОДЕЛИРОВАНИЕ ТАКТИЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ, РЕАЛИЗУЕМОЙ
С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА»



Рис. 1. Структура прототипа тактильного устройства

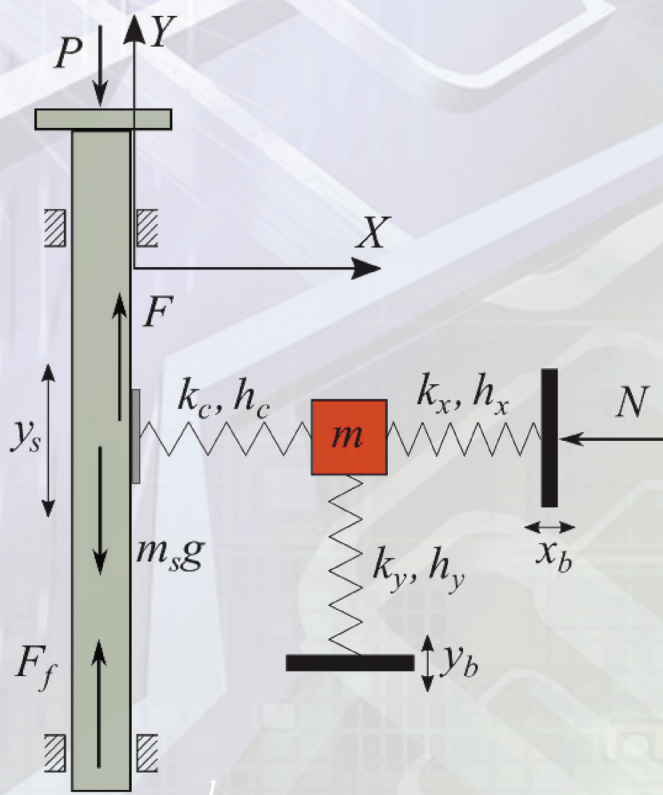
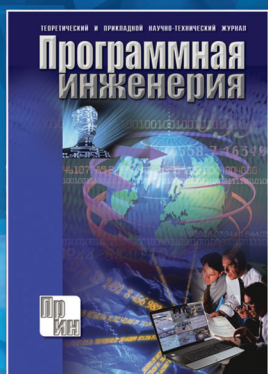


Рис. 3. Феноменологическая модель ПЭП

Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ” выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписной индекс по каталогу «Пресса России» – 39795



Ежемесячный теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по каталогу «Пресса России» – 94033

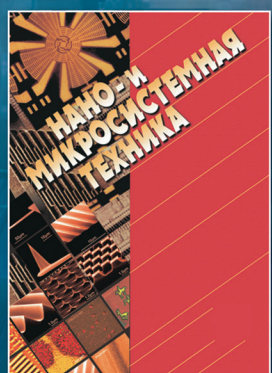


Научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по каталогу «Пресса России» – 94032



Ежемесячный междисциплинарный
теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписной индекс по каталогу «Пресса России» – 27849

Все журналы
распространяются
только по подписке.

Оформить подписку можно
через подписные агентства
либо непосредственно
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

E-mail: antonov@novtex.ru